

# COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS DE DESCRIPTORES DE TEXTURAS EN IMÁGENES MODIS

ÁNGEL RUIZ ALONSO

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA, FACULTAD DE INFORMÁTICA,  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Trabajo Fin Máster en Sistemas Inteligentes

Junio 2011

Calificación : 10 (SOBRESALIENTE)

Director  
Gonzalo PAJARES MARTINSANZ



## **Autorización de Difusión**

ÁNGEL RUIZ ALONSO

Junio 2011

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Investigación en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “Comportamiento y análisis de descriptores de texturas en imágenes MODIS”, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo la dirección de Gonzalo Pajares Matinsanz en el Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

## Resumen

En este trabajo se realiza un estudio sobre la efectividad de varios descriptores de textura en imágenes, que han sido utilizados exitosamente en imágenes obtenidas con dispositivos de captura dentro del espectro visible. Se propone el estudio de esos mismos descriptores para el análisis de imágenes obtenidas por medio de la plataforma MODIS (**Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**), instalada a bordo de dos satélites espaciales, Terra y Aqua de la NASA. Dado el vuelo periódico de los satélites es posible obtener imágenes de la misma zona espaciadas en el tiempo. Es esta característica temporal la que se aprovecha en este trabajo.

Dada una serie de imágenes de la misma zona, obtenidas en diferentes instantes de tiempo, el objetivo consiste en analizar la variación de ciertas regiones de la imagen en el tiempo. Esto se conoce como análisis temporal, y constituye el objetivo principal del trabajo.

Las imágenes utilizadas corresponden a la Comunidad Foral de Navarra procedentes de entornos rurales agrícolas y forestales. En este tipo de texturas la evolución temporal sólo es apreciable transcurridos largos periodos de tiempo, habitualmente años, siendo ésta la unidad temporal para el análisis.

Algunos estudios previos sobre análisis temporal en imágenes MODIS combinan varias bandas espectrales, para obtener lo que se conoce como índices de vegetación, observando así la evolución temporal de los mismos. Este trabajo amplía el ámbito del análisis temporal mediante el uso de seis descriptores de textura de naturaleza estadística para las imágenes MODIS. Dichos descriptores no sólo tienen en cuenta los valores espectrales de los píxeles individuales sino los de sus vecinos. El estudio de los valores proporcionados por los descriptores propuestos a lo largo del tiempo constituye una novedad para este tipo de imágenes, donde además se explotan las posibilidades del análisis considerando tanto el propio píxel bajo análisis como los vecinos, en un intento de capturar las texturas espaciales subyacentes.

## Palabras clave

**MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), teledetección, imágenes de satélite, texturas, descriptores de textura.**



## Abstract

This paper presents a study on the effectiveness of a series of texture descriptors in images. These descriptors have been applied successfully on images obtained in the visible spectrum. In this paper we propose the study of the same descriptors for image analysis platform with MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS is an imaging instrument aboard two NASA satellites, specifically Terra and Aqua. Given the regular flight of the satellites it is possible to obtain images the same area spaced in time. Is this temporary feature which is used in this work.

In fact, given different pictures of the same area, obtained in different times, the objective is to analyze the variation in certain regions of the image over time. This is technically known as temporal analysis being the main objective of this work.

The images used correspond to the region of Navarra (Spain), the region being examined and more specifically natural textures, mostly from rural agricultural and forest environments. In this type of textures, changes over time is significant only after long periods of time, specifically years. For this reason the relevant timeframe analysis is based on time periods where the unit is the year.

Some previous studies on temporal analysis on images of this type use some indexes, which combine several spectral bands, measuring what is known as vegetation indices, observing the temporal evolution of the same. This work extends the scope of temporal analysis using six texture descriptors, as previously mentioned, for MODIS images. These descriptors not only take into account the spectral values of individual pixels but also a number of neighbors. The study of the values provided by the proposed descriptors over time is a novelty for MODIS images where we also exploit the possibilities of the analysis considering both, the actual pixel under analysis and their neighbors, in an attempt to capture the spatial underlying texture.

## Keywords

**MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), remote sensing, satellite images, textures, textures descriptors.**



# Índice de contenidos

Autorización de Difusión .....	iii
Resumen.....	iv
Palabras clave.....	iv
Abstract .....	v
Keywords .....	v
Índice de contenidos .....	1
ÍNDICES DE FIGURAS .....	3
Agradecimientos .....	5
Capítulo 1 - Introducción .....	7
1.1.- Identificación del problema .....	7
1.2. Motivación y objetivos .....	10
1.2.1 Motivación .....	10
1.2.2 Objetivos .....	12
1.3 Metodología .....	13
1.4 Organización del trabajo .....	14
Capítulo 2 - Fundamentos de Teledetección: plataforma MODIS .....	15
2.1. Introducción .....	15
2.2 Fundamentos de Teledetección.....	15
2.2.1 Definición de teledetección.....	15
2.2.2 El espectro electromagnético .....	16
2.3 Plataforma MODIS .....	17
Capítulo 3 - Descriptores de texturas en imágenes .....	19
3.1 Introducción .....	19
3.2 Índices de vegetación.....	19
3.3. Descriptores de texturas: revisión de métodos .....	21
3.4. Descriptores de texturas seleccionados.....	25
Capítulo 4 - Análisis de resultados .....	31
4.1 Materiales y recursos disponibles .....	31
4.2. Procesamiento de las imágenes.....	36

4.3 Descripción del comportamiento de los descriptores de textura .....	38
4.4 Análisis de resultados .....	42
4.4.1 Resultados para el grupo 1 .....	42
4.4.2 Resultados para el grupo 2 .....	46
4.4.3 Resultados para el grupo 3 .....	50
4.4.4 Resultados para el grupo 4 .....	53
4.4.5 Análisis conjunto de descriptores .....	56
4.4.6 Consideraciones generales .....	57
Capítulo 5 - Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	59
5.1 Conclusiones .....	59
5.2 Líneas de trabajo futuras .....	60
Referencias.....	61

## ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de la Comunidad Foral de Navarra mostrando diferentes tonalidades según los índices de vegetación en las diferentes zonas.....	13
Figura 2. Espectro electromagnético.....	17
Figura 3. Ejemplo distribución píxeles en una imagen.....	37
Figura 4. Gráfica correspondiente a la media para el grupo 1.....	43
Figura 5. Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 1.....	43
Figura 6. Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo.....	44
Figura 7. Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 1.....	44
Figura 8. Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 1.....	45
Figura 9. Gráfica correspondiente a la media para el grupo 2.....	47
Figura10. Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 2.....	47
Figura11. Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 2.....	48
Figura12. Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 2.....	48
Figura13. Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 2.....	49
Figura14. Gráfica correspondiente a la media para el grupo 3.....	50
Figura15. Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 3.....	51
Figura16. Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 3.....	51
Figura17. Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 3.....	52
Figura18. Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 3.....	52
Figura19. Gráfica correspondiente a la media para el grupo 4.....	53
Figura20. Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 4.....	54
Figura21. Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 4.....	54
Figura22. Gráfica correspondiente a la entropía para grupo 4.....	55
Figura23. Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 4.....	55
Figura 24 Representación gráfica del descriptor entropía para los cuatro grupos de vegetación..	56
Figura 25. Representación gráfica del descriptor uniformidad para los cuatro grupos de vegetación.....	57



## **Agradecimientos**

Especial mención merecen tanto la Profesora Dra. Alicia Palacios como la investigadora Margarita Huesca, ambas pertenecientes a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes en la Universidad Politécnica de Madrid por su paciencia, dedicación y esfuerzo que me han proporcionado en relación al trabajo realizado, desde el suministro de las imágenes hasta la valoración de los resultados, pasando por la inestimable ayuda en determinados tratamientos de las imágenes utilizadas. Desde luego, seguro que nunca agradeceré suficientemente tanto trabajo y esfuerzo.





# Capítulo 1 - Introducción

## 1.1.- Identificación del problema

Una de las aplicaciones fundamentales en Teledetección espacial (Pinilla, 1993) resulta ser precisamente el análisis temático del contenido de las imágenes enviadas por los Sensores Remotos (Remote Sensing) o satélites espaciales.

Existen diversas plataformas satelitales capaces de enviar datos de las observaciones realizadas durante el trazado de sus respectivas órbitas. Una de ellas es precisamente la plataforma MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) (MODIS NASA, 2011). MODIS es un instrumento de captura de imágenes a bordo de dos satélites espaciales, concretamente *Terra* y *Aqua* de la NASA. Posee una capacidad de visualización de 2.330 km con la posibilidad de observar la superficie completa de la Tierra cada uno o dos días respectivamente. Sus sensores obtienen información procedente de 36 bandas espectrales con longitudes de onda comprendidas entre 0.405 y 14.385  $\mu\text{m}$ , y adquiere datos en tres resoluciones espaciales, a saber: 250m, 500m y 1.000m, algunas de las bandas anteriores son utilizadas para indicar la calidad de los píxeles.

Los datos o mejor dicho las imágenes obtenidas con MODIS permiten obtener características para la observación de la tierra, océanos o la atmósfera. Desde los inicios de la Teledetección ha habido un interés constante por analizar la superficie de determinadas zonas con diferentes fines, bien con vistas al aprovechamiento de recursos en el terreno agrícola y forestal (Galford y col., 2008) o de cara al mantenimiento y sostenibilidad de estructuras con cierto interés, tales como las forestales (Boatwright y col., 1986). Diversos estudios llevados a cabo por diferentes organismos o instituciones internacionales se han orientado en esta línea (Group on Earth Observations, 2007; National Agricultural Statistics Service, 2010). Igualmente existe un interés creciente por la observación de determinados parámetros con fines de prevención, tal es el caso de la identificación temprana de zonas de alto riesgo de cara a los incendios forestales (Huesca, 2007; Palacios y col., 2009) o por el contrario con el propósito de actuación tras producirse algún tipo de evento tal como incendios forestales o deforestación

(Chan y col., 2000; Bucha y Stibig, 2008). Gran parte de los trabajos referidos previamente se han basado en datos procedentes de la plataforma MODIS.

Muchos de los estudios anteriores, se han basado en el análisis temporal de las imágenes proporcionadas por MODIS, ya que gracias a la capacidad de revisita de las diferentes zonas de la superficie terrestre es posible obtener imágenes de la misma zona en diferentes instantes de tiempo. El análisis, por tanto, de estos datos desde el punto de vista del estudio de lo que se conoce como series temporales constituye un objetivo de interés en diferentes ámbitos de aplicación (Hüttich y col. 2009).

De lo anteriormente expuesto se deduce que el estudio de las texturas con cobertura vegetal a lo largo del tiempo constituye un objetivo de interés. Existen numerosos estudios orientados con tal propósito de forma que se determinan las variaciones temporales de la vegetación gracias al cómputo de los denominados índices de vegetación. En general, dichos índices se calculan a partir de la información suministrada por los sensores correspondientes, siendo muy habituales aquellos que utilizan las bandas espectrales correspondientes al espectro visible y al infrarrojo cercano, tal y como se describirá posteriormente. De esta manera, a cada píxel de la imagen se le asigna un valor dado por el índice de vegetación en función de los correspondientes valores que dicho píxel posee en las respectivas bandas espectrales del espectro visible e infrarrojo cercano. Esto significa que para calcular los valores de los índices de vegetación de cada píxel se utilizan exclusivamente los valores espectrales referidos a dicho píxel.

Bien es sabido que desde el punto de vista de la percepción humana, ésta se caracteriza por tender a agrupar o a ver conjuntamente grandes extensiones antes que la percepción de los elementos individuales. Así, ante una imagen conteniendo diferentes regiones, un usuario humano analiza en extenso la región sin fijarse en exclusiva en cada píxel. Realmente, este enfoque no es nuevo, ya que en el mundo de las imágenes se han realizado diversos trabajos en los que se ha puesto en práctica esta consideración. El origen de este tipo de percepción globalizada aplicada a las imágenes arranca de la aplicación de los principios de Psicología de la

Escuela de la Gestalt (Koffka, 1935) que para el caso de las imágenes se pueden sintetizar en los siguientes (Palmer, 1999):

- *Proximidad*: los píxeles que se sitúan próximos en el espacio tienden a agruparse.
- *Similitud*: los elementos que tienen propiedades similares, tales como luminancia, color, textura, etc., tienden igualmente a agruparse entre ellos.
- *Destino común*: los elementos que se mueven coherentemente, es decir con un movimiento común, también tienen tendencia a constituirse en grupos. Esto puede verse como un caso particular de la similitud. No obstante, se expresa separadamente con el fin de poner el énfasis en aspectos dinámicos de la escena.
- *Continuidad uniforme*: un conjunto de elementos sin discontinuidades significativas tienden a aglutinarse.
- *Conectividad y región común*: los elementos conectados espacialmente forman agrupaciones, que definen ciertas regiones de la imagen.
- *Familiaridad*: un conjunto de elementos que pertenecen a la misma estructura de patrones tienden a formar grupos homogéneos.

Aprovechando el mencionado enfoque, en este trabajo se propone la utilización de una serie de descriptores de textura, que se analizan detalladamente en el capítulo tres, los cuales tienen en cuenta las relaciones espaciales existentes entre un píxel de la imagen y los que le rodean. Son descriptores que se han utilizado en imágenes obtenidas con dispositivos de captura dentro del espectro visible, pero que hasta el momento y en lo que hemos podido investigar no se han aplicado en el análisis de resultados obtenidos con el cálculo de los índices de vegetación.

De esta manera, dada una estructura de datos en forma de imagen conteniendo los valores generados a partir de los índices de vegetación, es posible extraer diversas características de la textura desde un punto de vista contextual, es decir observando el comportamiento de un píxel en relación a los vecinos que le rodean y desde el punto de vista del análisis de la cobertura vegetal a través de los índices de vegetación.

Dadas diferentes imágenes de la misma zona, obtenidas en diferentes instantes de tiempo, el objetivo consiste en analizar la variación de determinadas regiones de la imagen en el tiempo. El análisis contextual en el tiempo constituye la principal aportación del presente trabajo de investigación, inédito hasta el momento en el ámbito de aplicación de la investigación propuesta en este trabajo, es decir aplicado a datos MODIS con los que se obtienen los índices de vegetación.

Las imágenes utilizadas en este trabajo pertenecen a la región correspondiente a la Comunidad Foral de Navarra, siendo esta región el objeto de análisis y más concretamente las texturas naturales, básicamente procedentes de entornos rurales agrícolas y forestales. En este tipo de texturas la evolución temporal sólo es apreciable transcurridos largos periodos de tiempo, que coinciden fundamentalmente con la variación estacional de la cobertura vegetal. Por tal motivo, el análisis temporal referido, se basa en periodos de tiempo suficientemente amplios como para ser capaces de detectar dichas variaciones temporales.

## **1.2. Motivación y objetivos**

### ***1.2.1 Motivación***

El trabajo que se presenta tiene su origen en las actividades de investigación planteadas dentro del grupo ISCAR (2011) en lo relativo al tratamiento de imágenes. Los trabajos precursores de esta investigación provienen de los estudios previos relativos a la detección de cambios, cuyos resultados aparecen en los trabajos de investigación de Pajares (2006) y Pajares y col. (2009). En ellos se plantea el análisis de las imágenes desde el punto de vista de lo que técnicamente se conoce como *detección de cambios en imágenes*, lo que de algún modo constituye una especie de análisis temporal en tanto en cuanto las diferencias se establecen en relación a secuencias de imágenes obtenidas en distintos instantes de tiempo. Posteriormente, dentro de las investigaciones del mismo grupo ISCAR (2011), se han realizado estudios tendentes al análisis temporal en secuencias de imágenes para localización de robots autónomos en el marco del siguiente proyecto: “FONCYCIT (Unión Europea-México) (2009-2011) Análisis de Imágenes para el Control de Robots Autónomos, con participación de la Universidad

Complutense, el Instituto Politécnico Nacional de México, la Universidad de Guadalajara en México y la Universidad Libre de Berlín”.

Los trabajos de Pajares (2006) y Pajares y col. (2009) contienen estudios relativos al análisis temporal en imágenes procedentes del satélite IKONOS (2011), que junto con los trabajos referenciados en ellos realizados por Bruzzone y Fernández-Prieto (2000a,b, 2002), estos últimos específicamente centrados en imágenes de satélite, constituyen una buena base para el análisis temporal de imágenes. Una de las principales novedades de este estudio consiste en que dicho análisis se realiza píxel a píxel, si bien teniendo en cuenta los vecinos que rodean a cada píxel para capturar no sólo la información propia del píxel sino también la contextual.

Posteriormente y en el marco del *Campus de Excelencia de Moncloa* se establece una relación entre el grupo ISCAR y el grupo liderado por la Profesora Dra. Alicia Palacios y varios miembros del mismo, entre quienes destaca la investigadora Margarita Huesca, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes en la Universidad Politécnica de Madrid. En el mencionado grupo el interés se centra en el análisis temporal basado en imágenes MODIS. Diversas investigaciones llevadas a cabo previamente en este último grupo se han centrado en el estudio temporal de las imágenes mediante el análisis de índices de vegetación.

La conjunción de ambas líneas de investigación, finaliza en la propuesta del proyecto que se plantea en este trabajo de investigación donde destacan los siguientes aspectos:

1. Análisis temporal de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS
2. Aplicación de descriptores de texturas a los datos conteniendo los índices de vegetación.

Los dos puntos anteriores confluyen en el estudio contextual relativo a los índices de vegetación en determinadas zonas desde la perspectiva de la evolución temporal de las regiones analizadas en la Comunidad Foral de Navarra.

### **1.2.2 Objetivos**

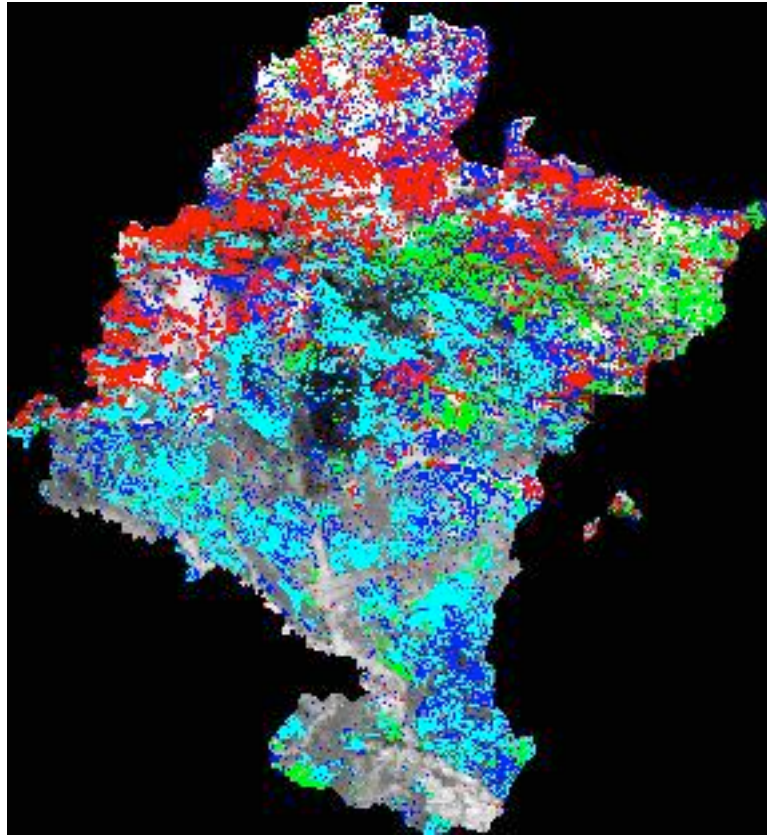
En base a lo anteriormente expuesto, los siguientes objetivos son los que se plantean dentro del proyecto de investigación que se presenta:

- 1) Aprender a manejar referencias bibliográficas, así como la forma de abordar las investigaciones.
- 2) Aprender a investigar en colaboración con diferentes grupos de investigación.
- 3) Identificar descriptores de textura, existentes en la literatura, aplicables a imágenes en general y su adaptación a las imágenes MODIS.
- 4) Estudiar el comportamiento a lo largo del tiempo de los descriptores identificados previamente.
- 5) Realizar un aporte de carácter investigador mediante el estudio comparativo sobre el comportamiento de los descriptores de textura aplicados a las imágenes MODIS, estableciendo las bases para su ampliación a otros tipos de plataformas de captura de imágenes.

Un aspecto importante a tener en cuenta es el hecho de que desde la perspectiva de este trabajo no se pretende llevar a cabo ningún análisis de vegetación, el cual compete exclusivamente a los técnicos en la materia, sino proporcionar las herramientas necesarias en el ámbito de la Visión por Computador (Pajares, 2007a,b) y por extensión en el campo de las tecnologías informáticas

En la figura 1 se muestra una imagen representativa de los índices de vegetación correspondientes a la Comunidad Foral de Navarra. En ella se representan bajo diferentes tonalidades de color los valores de dichos índices correspondientes a cada una de las zonas o regiones dentro de la Comunidad. Las tonalidades verdes se identifican con regiones conteniendo un elevado índice de vegetación y por consiguiente relativas a masas donde la cubierta vegetal resulta ser significativa en el momento de la captura de la imagen. Las zonas rojas contienen valores del índice de vegetación bajos, por tanto se identifican con zonas que carecen de masas vegetales verdes. El resto de colores identifican regiones con diferentes valores correspondientes

a cubiertas con niveles de vegetación situados entre los valores más bajos y más altos respectivamente.



**Figura 1.** Imagen de la Comunidad Foral de Navarra mostrando diferentes tonalidades según los índices de vegetación en las diferentes zonas

### 1.3 Metodología

El esquema general propuesto para la consecución de los objetivos anteriormente mencionados sigue básicamente los siguientes pasos:

- 1) En primer lugar se realiza una revisión bibliográfica sobre los métodos descritos en la literatura.
- 2) Se seleccionan los métodos más apropiados en relación a la problemática planteada desde el punto de vista del análisis de texturas.
- 3) Se estudia su comportamiento sobre las imágenes MODIS disponibles.
- 4) Se estudian los resultados obtenidos sobre las mismas.

## **1.4 Organización del trabajo**

La memoria se organiza en capítulos, de forma que en el capítulo dos se introducen los aspectos más relevantes en relación a la plataforma MODIS. En el capítulo tres se realiza una revisión bibliográfica sobre descriptores de textura utilizados en imágenes, para posteriormente estudiar y describir los que se utilizan en este trabajo de investigación. En el capítulo cuatro, se analiza el comportamiento de los descriptores estudiados en función de los resultados obtenidos, realizando una valoración sobre dicho comportamiento. Finalmente, en el capítulo cinco se exponen las conclusiones y trabajo futuro.



## **Capítulo 2 - Fundamentos de Teledetección: plataforma MODIS**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se introducen los aspectos más relevantes relativos a los fundamentos de teledetección con particular énfasis en el proceso de formación de imágenes. Posteriormente se proporcionan algunos detalles relativos a la plataforma de captura de imágenes MODIS, que constituye la fuente a través de la cual se obtienen las imágenes utilizadas en este proyecto.

### **2.2 Fundamentos de Teledetección**

#### ***2.2.1 Definición de teledetección***

Existen varias posibles definiciones sobre el concepto de teledetección espacial:

- La teledetección es una traducción del inglés “remote sensing” o lo que es lo mismo la percepción remota. La teledetección es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (Chuvienco, 1996b).
- La teledetección es la ciencia de adquirir imágenes de la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella, además de procesar, analizar y aplicar la información obtenida (Canadian Center for Remote Sensing, 2011).
- La percepción remota es la colección de información de un objeto sin estar en contacto físico con él. Aeroplanos, aviones y satélites son las plataformas más comunes desde donde las observaciones remotas son realizadas. El término percepción remota es restrictivo a métodos que emplean energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto (Sabins, 1978).

La teledetección consiste en la identificación de los objetos a partir de las diferencias en la energía reflejada. La posibilidad de adquirir información a distancia se basa en lo específico de

la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Todos los objetos tienen una respuesta espectral propia y además esta combinación espectral es similar a la que presentan otros objetos o superficies de las mismas características u homogeneidad.

### ***2.2.2 El espectro electromagnético***

El comportamiento espectral de los objetos localizados en la superficie terrestre depende de cuatro factores determinantes, relacionados con las propiedades físicas de los mismos:

**Reflectividad:** determinada por la cantidad de energía que refleja la cubierta.

**Absortividad:** determinada por la cantidad de energía que absorbe la cubierta.

**Emisividad:** energía emitida por todos los cuerpos, debida a su temperatura.

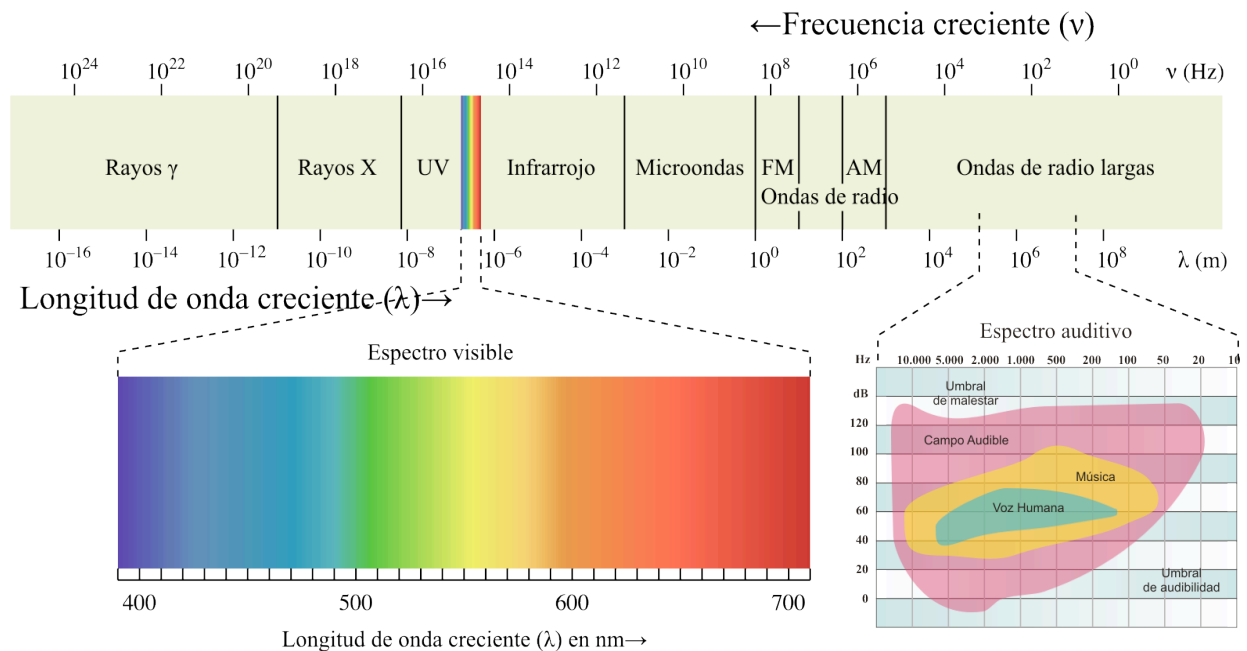
**Transmisividad:** definida como la capacidad de transmitir la energía recibida a los cuerpos circundantes (Cotesa, 2004).

La percepción remota implica la medición de la energía electromagnética que es reflejada y emitida por objetos (naturales o sintéticos) y sin entrar en contacto con ellos. La energía electromagnética es un tipo de energía que proviene de la oscilación de las descargas eléctricas, por lo que es posible definir totalmente cualquier tipo de energía proporcionando su longitud de onda (o frecuencia) (Esser et al., 2003).

El espectro electromagnético es la sucesión continua de esos valores de frecuencia, aunque conceptualmente se divide en bandas, de forma que dentro de cada banda la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

En la figura 2 se muestra un esquema representativo del espectro electromagnético, donde en la parte superior se representa la variación correspondiente a las diferentes longitudes de onda variando desde los 10 Km (muy altas longitudes de onda) hasta los  $10^{-6}$  nm (muy pequeñas longitudes de onda).

Dentro del espectro se sitúa la parte correspondiente al visible que comprende la zona entre los 700nm y los 400nm. A la izquierda del rojo, se sitúa el infrarrojo cercano con longitudes de onda por encima de los 700nm. Como se verá posteriormente, los índices de vegetación se obtienen a partir de la información situada precisamente en la zona del visible junto con el infrarrojo cercano, siendo por tanto el rango de frecuencias entre ambos el que verdaderamente constituye el objeto de interés en relación a la investigación desarrollada en este trabajo.



**Figura 2.** Espectro electromagnético

## 2.3 Plataforma MODIS

El instrumento MODIS se encuentra actualmente funcionando tanto en la plataforma Terra como en Aqua. Posee un campo de vista de 2330 km capaces de visitar toda la superficie de la Tierra cada uno o dos días respectivamente, tal y como se ha mencionado previamente. Sus sensores poseen capacidad para recibir radiaciones electromagnéticas en 36 bandas espectrales cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 0.405 y 14.384  $\mu\text{m}$ , abarcando por tanto todo el rango visible y el infrarrojo, que constituyen el objeto de interés, tal y como puede fácilmente

deducirse del gráfico mostrado en la figura 2. Además, adquiere los datos en tres resoluciones espaciales (250, 500 y 1000 metros).

Junto con todos los datos de otros instrumentos a bordo de las naves espaciales Terra y Aqua, los datos de MODIS se transfieren a las estaciones de tierra en White Sands, Nuevo México, a través del seguimiento y retransmisión de datos por satélite (TDRSS). Los datos se envían a las correspondientes Bases de Datos de EOS y al Sistema de Operaciones (EDOS) en el Goddard Space Flight Center.

Los datos suministrados por las plataformas MODIS poseen información relativa tanto a la superficie terrestre como a las masas oceánicas e incluso de la atmósfera, pudiendo ser utilizados para análisis a escala tanto local como global.

En el trabajo que nos ocupa, el análisis realizado se lleva a cabo de forma local, restringido al ámbito de la Comunidad Foral de Navarra a la que pertenecen las imágenes utilizadas en este estudio, en relación a una supuesta área global correspondiente a la superficie terrestre. Dentro de esta región se analizan a la vez diversos tipos de texturas correspondientes a áreas o regiones de menor tamaño, por lo que el ámbito de aplicación sigue siendo de naturaleza local.

## **Capítulo 3 - Descriptores de texturas en imágenes**

### **3.1 Introducción**

Como se ha mencionado en la introducción del capítulo uno, el objetivo de este trabajo consiste en la descripción de la evolución temporal de las texturas existentes en una determinada región espacial de la imagen de la cual se ha extraído información sobre la cobertura vegetal a través de los denominados índices de vegetación.

Aunque los índices de vegetación no constituyen en sí mismos el objetivo de la investigación propuesta en el presente trabajo, conviene mencionar algunos detalles en relación a los mismos, debido a que constituyen los datos de entrada en relación al estudio multi-temporal que aquí se realiza.

El presente capítulo se plantea de forma que en primer lugar se introduce el sentido de los índices de vegetación, para posteriormente realizar un estudio sobre diferentes descriptores de texturas, así como su utilidad desde el punto de vista de la investigación que se propone en el presente trabajo.

### **3.2 Índices de vegetación**

Las plataformas satelitales proporcionan una serie de bandas espectrales, entre dichas plataformas se encuentra la plataforma MODIS tal y como se ha mencionado previamente. Una de las utilidades que dichas plataformas proporcionan es la posibilidad de analizar lo que se conoce como índices de vegetación, que permite enfatizar y extraer propiedades de los objetos relacionadas con la vegetación en tanto que minimizan la influencia de factores distorsionantes, tales como el suelo, la radiación solar, el ángulo de elevación del Sol y la propia atmósfera (Huesca 2007; Chuvieco, 1996; Pinilla, 1995).

Estos índices se calculan píxel a píxel, teniendo en cuenta que la vegetación vigorosa absorbe radiación en la zona del visible, especialmente en la banda del Rojo (R) con longitudes

de onda entre 0.6-0.7  $\mu\text{m}$ , en tanto que refleja gran parte de la que incide en el infrarrojo cercano (*Near InfraRed*, NIR) con longitudes de onda comprendidas entre el 0.7 y 1.0  $\mu\text{m}$ . La vegetación afectada por clorosis, por infección o por senescencia, ofrece por el contrario, una signatura espectral más plana, con valores de reflectancia más parecidos en ambas bandas, que llegan a ser prácticamente iguales cuando la vegetación está marchita o cuando se trata de suelos desnudos y por tanto carentes de vegetación.

Uno de dichos índices, probablemente de los más sencillos, es el que se obtiene a través de la expresión siguiente,

$$IV = NIR - R \quad (2.1)$$

Otro ejemplo de tales índices es el denominado índice de la razón de vegetación RVI (Ratio Vegetation Index) (Pearson y Millar, 1972),

$$RVI = \frac{NIR}{R} \quad (2.2)$$

Sin embargo uno de los índices de vegetación más difundidos es el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), definido como sigue,

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2.3)$$

En el *NDVI* el intervalo de existencia está acotado entre -1 y +1, lo que facilita sin duda alguna la comparabilidad y la interpretación de los resultados. Este índice está estrechamente relacionado con el tipo de vegetación. El cual aumenta a medida que lo hace la diferencia entre el infrarrojo cercano y el rojo. Valores altos del NDVI indican vegetación sana ya que provienen de una muy alta reflectancia en el infrarrojo próximo y baja en el visible; por el contrario valores

próximos a cero indican la existencia de suelo desnudo y vegetación seca, mientras que los valores negativos corresponden a nieve, nubes, agua, etc. (Esser y col., 2003). El estudio de las series temporales basadas en el NDVI, muestran la tendencia del desarrollo de la vegetación natural y de los cultivos (Volante y col., 2003), por lo que suele ser de gran utilidad para la realización de análisis agrícolas o forestales en el tiempo.

Destacan también la utilización de los índices de vegetación para análisis relativos al estudio de la pérdida de agua de las plantas por evaporación y transpiración, tal es el caso de los estudios realizados en Scott Murray y col. (2009), precisamente con datos obtenidos a partir de la plataforma MODIS Terra.

### **3.3. Descriptores de texturas: revisión de métodos**

La descripción de las texturas subyacentes en imágenes ha constituido uno de los grandes temas en el campo de la Visión Artificial o Visión por Computador (Pajares, 2007a,b). De forma específica se han utilizado desde el punto de vista de las imágenes obtenidas con sensores trabajando dentro del rango de longitudes de onda correspondientes al espectro visible. Puesto que como ya se ha mencionado anteriormente y hasta donde hemos podido investigar, la utilización de descriptores a nivel espacial no se ha aplicado para la descripción de texturas subyacentes en datos procedentes del cálculo de los índices de vegetación, se hace necesaria la investigación de descriptores aplicados a imágenes tradicionalmente obtenidas con sensores operando en el espectro visible.

Aunque intuitivamente se pueden asociar diversas propiedades de las imágenes, tales como suavidad, rugosidad, regularidad, etc. (Gonzalez y Woods, 2008; Bharati y col., 2004), realmente no existe una definición formal o completa de textura. Muchos investigadores describen la textura utilizando varias definiciones. Russ (1999) considera la textura de una imagen como la variación entre píxeles en una pequeña vecindad de una imagen. Alternativamente, la textura puede describirse como un atributo que representa la distribución espacial de los niveles de intensidad en una región dada de una imagen digital (Bharati y col., 2004). Existe, en ambas definiciones, el concepto de variación espacial en un entorno de

vecindad, que es realmente el que se aplica en el presente trabajo. Por otra parte, en las definiciones anteriores intervienen los niveles de intensidad de los píxeles, sin embargo en nuestro caso se aplicará sobre los valores de los índices de vegetación en lugar de las intensidades, lo que como ya se ha mencionado reiteradamente representa una diferencia sustancial importante.

En cualquier caso, los enfoques utilizados para analizar las texturas son muy diversos, y difieren entre ellos principalmente en el método utilizado para extraer las características de la textura. Siguiendo la taxonomía expuesta en Bharati y col. (2004), básicamente se identifican cuatro categorías:

- 1) Métodos estadísticos
- 2) Métodos estructurales
- 3) Métodos basados en el modelo
- 4) Métodos basados en una transformada

#### Métodos estadísticos

Son técnicas que describen las texturas de las regiones en la imagen a través de los momentos estadísticos de orden superior basados en los correspondientes histogramas de niveles de intensidad (Tomita y Tsuji, 1990). Dentro de los descriptores estadísticos se encuentran los basados en las denominadas matrices de co-ocurrencia (González y Woods, 2008; Pajares, 2008; Haralick y col. 1973). También se han utilizado métodos basados en la descomposición de Valores Singulares (Singular Value Decomposition, SVD), éstos consideran la imagen como una matriz y calculan los valores singulares, que en definitiva representan la textura de la imagen, si bien se han enfocado más bien hacia clasificación (Ashjari, 1982; Kvaal y col., 1998).

Desde el punto de vista del análisis de texturas propuesto en este trabajo los más apropiados son los primeros, esto es, los descriptores basados en momentos estadísticos. Esto es así porque los basados en las matrices de coocurrencia necesitan como primera medida definir un predicado que deben cumplir los píxeles en la imagen, es a partir de estos predicados como se construyen las mismas. Para dar un ejemplo de esta situación supóngase que se define como



predicado “encontrar un píxel con intensidad mayor que el dado por encima y a la izquierda”. Obviamente, dada la distribución totalmente aleatoria de las texturas vegetales, no es posible definir tales predicados, por lo que la utilización de las matrices de co-ocurrencia se descartan por esta circunstancia como descriptores de textura. Por otro lado, los SVD por su propia naturaleza se usan para clasificación temática, por tanto en el caso que nos ocupa no constituyen un objetivo de interés. Finalmente, dentro de este grupo los más apropiados resultan ser los basados en el histograma ya que la aleatoriedad en la distribución de las texturas permite su aplicación con grandes ventajas, esto es debido a que no se necesita que las texturas aparezcan con determinadas distribuciones, sino que cualquier disposición espacial de las mismas admite la utilización de estos descriptores.

### *Métodos estructurales*

Se trata de técnicas que describen las texturas como la composición de elementos de textura bien definidos, tales como líneas paralelas regularmente espaciadas, o concatenaciones de figuras geométricas de formas conocidas tales como pentágonos u otras formas geométricas. Requieren igualmente la definición de reglas que permitan diseñar tal encadenamiento. Se han propuesto varias técnicas para analizar este tipo de texturas, entre ellas las que usan diferentes formas como elementos estructurales (Carlucci, 1972). Evidentemente, dada la naturaleza de las texturas objeto de análisis en este trabajo, este tipo de descriptores no tiene cabida alguna.

### *Métodos basados en el modelo*

Estas técnicas se fundamentan en la construcción de un modelo empírico de cada píxel en la imagen basado en una suma ponderada de las intensidades de los píxeles en la vecindad del primero. Los parámetros estimados de los modelos así generados se utilizan como descriptores de las características de la textura. Ejemplos de este tipo de descriptores son los modelos auto regresivos (Arkar y col. 1997), los campos aleatorios de Markov (Cross y Jain, 1983) o los modelos fractales (Keller y col. 1989). De nuevo, desde el punto de vista de nuestras texturas no es posible la definición de parámetros ni la creación de modelos estructurales, por lo que ciertamente este método no resulta aplicable en nuestro caso.

### Métodos basados en una transformada

Estas técnicas convierten la imagen en una nueva forma o espacio utilizando las propiedades de frecuencia espacial de las variaciones de intensidad de los píxeles. Dependen del tipo de transformada aplicada. Indhal y Næs (1998) aplican la transformada rápida de Fourier bidimensional, esta transformada extrae las componentes de frecuencia (altas o bajas) que caracterizan las estructuras subyacentes en las imágenes. Ciertamente, la aplicación de estas técnicas en el caso de las imágenes conteniendo índices de vegetación no resulta apropiado porque las componentes de alta o baja frecuencia pueden proceder tanto de texturas vegetales como no vegetales, por lo que no cabe la posibilidad de discriminar las texturas objeto de interés en este trabajo. Geladi (1992) propone técnicas de clasificación basadas en la transformada de Componentes Principales, que se aplican a varias imágenes, esta técnica requiere la disposición de varias imágenes de la misma zona y tomadas en el mismo instante de tiempo, por lo que tampoco resulta ser una técnica apropiada en nuestro caso, ya que aunque sí se disponen de varias imágenes de la misma zona, éstas se obtienen en diferentes instantes de tiempo. Las transformadas basadas en el análisis estructural para identificar determinadas estructuras espaciales también se han propuesto en el análisis de texturas, una de ellas es la conocida como de Wavelets (Galford y col., 2008; Ouma y col., 2006; Qiao y Lu, 2006; Arivazhagan y Ganesan, 2003; Portilla y Simoncelli, 2000; Zhu y Yang 1998; Bovik y col. 1990; Unser, 1995) y Gabor (Kruizinga y col., 1999). La transformada de Wavelets tiene la capacidad de descomponer la imagen en lo que se conocen como coeficientes, distinguiéndose entre los denominados coeficientes de aproximación, que mantienen la estructura original de la imagen y los coeficientes de detalle: horizontales, verticales y diagonales. En el caso de los coeficientes de aproximación no se extrae información de la imagen, siendo los de detalle los que contienen la información de la textura. La extracción de estos últimos se lleva a cabo mediante la aplicación de filtros sucesivos de paso alto y paso bajo horizontales y verticales convenientemente combinados (Pajares, 2007a,b), el objetivo consiste en detectar estructuras de naturaleza horizontal, vertical o diagonal en las imágenes. Dada la naturaleza de las estructuras vegetales presentes en las imágenes analizadas, este tipo de transformadas, aunque extraen los mencionadas coeficientes, éstos no serían descriptivos de las texturas vegetales, dada la irregular distribución de las mismas. Algo similar ocurre en el caso de los filtros de Gabor, ya que se tratan de filtros direccionales, en este caso con capacidad de detectar estructuras con

orientaciones en cualquier dirección del espacio, esto se consigue variando un parámetro que determina la orientación de la textura. Además, también, mediante el control de un segundo parámetro de distancia se pueden detectar estructuras regularmente espaciadas. De nuevo, resulta evidente que en el caso que nos ocupa este tipo de estructuras no están presentes en las imágenes objeto de estudio en este trabajo.

Tsaneva y col. (2010) han utilizado descriptores de texturas en imágenes MODIS con el fin de analizar la evolución en la cobertura de los suelos para determinar la influencia ecológica de los posibles cambios en la zona del Mar Negro sobre los países que le rodean (Bulgaria, Georgia, Rumanía, Rusia, Turquía y Ucrania). Han aplicado alguno de los métodos descritos previamente, principalmente descriptores de naturaleza estadística, incluyendo momentos de segundo orden o entropía y Wavelets desde el punto de vista de la clasificación, en cualquier caso calculan propiedades tales como desviación estándar, energía o entropía de los coeficientes de análisis y de detalle tanto horizontales como verticales o diagonales. Ciertamente, esta aplicación difiere claramente de la planteada en el presente trabajo de investigación en el sentido de que en este caso se extrae la información de la textura a partir de las imágenes originales MODIS, mientras que en nuestra aplicación se trata de extraer información a partir de los índices de vegetación y por tanto a partir de imágenes que han sido tratadas directamente. Desde esta última perspectiva, conviene resaltar el hecho de que en nuestro caso no es necesario realizar clasificación alguna, ya que la cobertura vegetal de las texturas objeto de análisis se obtiene directamente a partir del cómputo de los índices de vegetación previamente calculados.

### **3.4. Descriptores de texturas seleccionados**

Del estudio realizado previamente y por las razones expuestas, se deduce ciertamente que en el caso de las texturas bajo análisis en el presente trabajo de investigación, los descriptores más apropiados resultan ser los de naturaleza estadística.

Estos descriptores se han planteado originariamente para su aplicación a imágenes de gris. En el caso que nos ocupa su aplicación es para imágenes conteniendo los valores de los

índices de vegetación calculados para todos y cada de uno de los píxeles presentes en las imágenes MODIS, tal y como se ha expuesto previamente.

En la descripción que sigue a continuación se mantiene la nomenclatura original referida a niveles de intensidad, si bien para su interpretación desde el punto de vista que nos ocupa, simplemente se trata de cambiar niveles de gris por valores de índice de vegetación. Igualmente, al hablar del histograma de los niveles de gris, en nuestro caso sería histograma de los índices de vegetación. Cabe todavía una cuestión previa al respecto, como se verá en el capítulo cuatro, para el análisis de resultados se utiliza la herramienta ENVI 4.5 (2010) de gran difusión en sistemas GIS (Geographical Information Systems) para tratamiento de imágenes de satélite, principalmente bajo análisis hiperespectral. Es habitual que este tipo de herramientas traten los datos como imágenes, con tal propósito resulta frecuente convertir los datos de entrada, en este caso los índices de vegetación a un rango característico de representación de imágenes, siendo el más habitual el que utiliza un byte para la representación del valor del índice de vegetación para un píxel, de este modo, en el caso que nos ocupa, los valores de los índices de vegetación variarán en el rango discreto  $[0,255]$ , exactamente igual que en el caso de imágenes de gris con la misma representación de ocho bits (byte). Por consiguiente, en la descripción de los operadores que se presentan a continuación se utiliza como concepto el de niveles de gris o intensidad en el rango  $[0,255]$ , sabiendo que su aplicación al caso de los índices de vegetación es directa e inmediata con comportamientos similares.

Los descriptores de naturaleza estadística resultan ser precisamente de los más simples, no por ello menos eficaces (González y Woods, 2008; Pajares 2007a,b; Haralick y col., 1973). Se basan en la descripción de las texturas utilizando momentos estadísticos del histograma de los niveles de gris de una imagen en una región. Supongamos  $z$  una variable aleatoria que denota los niveles de intensidad en la imagen y sea  $p(z_i)$  con  $i = 0, 1, 2, \dots, L-1$  el histograma correspondiente, donde  $L$  es el número de niveles de intensidad distintos y por tanto en el caso que nos ocupa y en la representación de byte,  $L$  toma el valor de 256.

A partir de la consideración anterior es posible calcular el valor medio  $m$  de  $z$ , esto es, el nivel medio de intensidad en una región caracterizada por sus valores de intensidad  $z_i$  con sus correspondientes probabilidades  $p(z_i)$ . Este valor viene dado por la expresión siguiente,

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i) \quad (2.4)$$

El momento  $n$ -enésimo de  $z$  sobre la media se define teniendo en cuenta la expresión siguiente,

$$\mu_n(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^n p(z_i) \quad (2.5)$$

Obsérvese, a partir de la ecuación (2.2), que  $\mu_0(z) = 1$  cuando todos los niveles de intensidad  $z_i$  participan en el cómputo, ya que matemáticamente hablando en una distribución de probabilidad, la suma de todas las probabilidades debe ser la unidad, que es además una de las propiedades que debe cumplir cualquier función de probabilidad. Por otra parte,  $\mu_1(z) = 0$  como fácilmente puede comprobarse a partir de la ecuación (2.2).

El segundo momento, que representa la varianza,  $\mu_2(z) = \sigma^2(z)$ , resulta de particular importancia en la descripción de las texturas. Este momento posee capacidad propia para describir la textura, ya que representa las desviaciones con respecto de la media de los valores de intensidad en una región dada. Por consiguiente, mide el contraste de los valores de intensidad en esa región. Así, una región homogénea donde todos los píxeles poseen el mismo valor de intensidad la varianza será nula, mientras que en regiones con elevados contrastes la varianza será alta. En este trabajo, se ha utilizado la desviación típica o estándar que es la raíz cuadrada de la varianza, posee un comportamiento similar y tiende a ser más intuitiva para mucha gente, tal y como se apunta en González y Woods (2008).

A partir de la varianza se introduce el descriptor de textura conocido como suavidad de la textura (González y Woods, 2008) definido como sigue,

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2(z)} \quad (2.6)$$

$R$  es cero para regiones de intensidad constante, lo que implica regiones de intensidad constante con varianza cero y tiende a 1 para valores grandes de la varianza  $\sigma^2(z)$ , proveniente de variaciones significativas de la intensidad en la región analizada. En resumen, valores bajos de  $R$  indican la presencia de una textura homogénea con escaso contraste y viceversa, valores altos son indicativos de que la textura representa una región no homogénea con altos contrastes en lo que a niveles de intensidad se refiere.

El tercer momento está definido por la expresión siguiente,

$$\mu_3(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i) \quad (2.7)$$

Es una medida de la deformación del histograma, mientras que el cuarto y quinto momentos miden de alguna manera lo plano que es el histograma. Concretamente el momento de orden tres mide la asimetría de un histograma. Esta medida es 0 para histogramas simétricos, positivo para histogramas sesgados a la derecha (sobre la media) y negativos para los histogramas de sesgo a la izquierda. Realmente, tanto los momentos de orden tres como de órdenes cuatro y cinco no son de utilidad en la descripción de las texturas vegetales objeto de la presente investigación, ya que el hecho de que el histograma tenga una determinada forma no es indicativo de una textura relevante desde nuestro punto de vista, máxime teniendo en cuenta la aleatoriedad que caracteriza a las texturas analizadas. En definitiva, no se utilizan en nuestro análisis, si bien hemos preferido introducirlos en el estudio teórico por si en el futuro son aplicables a algún tipo de textura en las que la forma del histograma pudiera ser relevante.

Otro descriptor significativo de texturas basado en histogramas es el que mide lo que se conoce como uniformidad dado por la expresión siguiente,

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i) \quad (2.8)$$

Puesto que las probabilidades por definición varían en el rango  $[0,1]$  y la suma de probabilidades es 1, tal y como se ha mencionado previamente,  $U$  será máxima para una imagen en la que todos los niveles de gris sean iguales (máxima uniformidad), decreciendo a partir de ese valor máximo a medida que los valores de intensidad comienzan a diferenciarse entre sí dentro de la región, lo que se traduce en pérdida de homogeneidad. Por tanto, para una región

homogénea,  $U$  es máxima y para una región no homogénea resulta ser tanto menor cuanto mayor sea la discrepancia de valores de los píxeles. Por consiguiente, el comportamiento de este descriptor resulta ser de naturaleza diferente tanto respecto de la desviación estándar como de la suavidad de la textura donde las regiones homogéneas y no homogéneas presentan valores mínimos y máximos respectivamente. Con el fin de unificar criterios y para facilitar el análisis de resultados, en este trabajo hemos redefinido el descriptor para que exprese un comportamiento contrario al descrito anteriormente, esto se realiza a través de la expresión siguiente, teniendo en cuenta que las probabilidades varían en el rango  $[0,1]$ ,

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} (1 - p(z_i))^2 \quad (2.9)$$

Finalmente, la medida de la entropía media resulta ser un descriptor de interés en el análisis estadístico de texturas.

$$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i) \quad (2.10)$$

La entropía en el mundo físico expresa o mide el grado de desorden de un sistema, de forma que a mayor desorden mayor entropía y viceversa. Para ilustrar este concepto, supongamos un sistema físico constituido por una sustancia en estado sólido. En este estado las moléculas de la sustancia están fuertemente ligadas entre sí por enlaces y por tanto poseen un cierto orden. Si la sustancia se calienta, muchos de esos enlaces se rompen por el incremento de energía del sistema y las moléculas comienzan a desordenarse, en este caso la entropía aumenta. Ni que decir tiene cuando se continua calentando, en cuyo caso los enlaces se siguen rompiendo hasta alcanzar probablemente el estado gaseoso donde las moléculas se encuentran prácticamente libres de enlaces y por tanto con un alto grado de desorden que se traduce en una mayor entropía con respecto a los estados anteriores. Esta idea trasladada al contexto de las imágenes nos permite deducir que cuando en un entorno de vecindad alrededor de un píxel existe un alto grado de desorden, la entropía será mayor que cuando existe un cierto orden. En definitiva, la entropía es una medida de variabilidad siendo cero para una imagen con niveles de intensidad constantes.

En la tabla 3.1 se resume el comportamiento de los descriptores de textura analizados en esta sección desde el punto de vista de los valores que toman cuando se aplican a regiones

homogéneas y no homogéneas caracterizadas por poseer valores de intensidad constante o altamente variables respectivamente.

Tabla 3.1 Resumen de los descriptores de textura para regiones homogéneas y no homogéneas

Descriptor	Región homogénea	Región no homogénea
Varianza	Baja	Alta
Suavidad	Baja	Alta
Uniformidad	Baja	Alta
Entropía	Baja	Alta

Conviene añadir, que la media de intensidad de una región no es en sí mismo un descriptor de textura. Simplemente expresa el nivel medio de intensidad en la región. De forma que en el caso de los índices de vegetación, que constituye el objetivo de la investigación que se presenta en este trabajo, expresa el nivel medio del índice de vegetación para la región considerada.



## **Capítulo 4 - Análisis de resultados**

### **4.1 Materiales y recursos disponibles**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con los cuatro descriptores de textura estudiados y considerados como relevantes.

Como se ha mencionado previamente, las imágenes analizadas en este trabajo se corresponden espacialmente con el territorio de la Comunidad Foral de Navarra.

Dichas imágenes son el resultado de la extracción del índice de vegetación a partir de las bandas espectrales proporcionadas por el sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. En concreto se ha aplicado el índice de vegetación NVDI definido en la ecuación (2.3).

En total se dispone de un conjunto de 464 imágenes que proporcionan información temporal de las diferentes estructuras existentes en las mismas. Entre cada dos imágenes existe un espaciado temporal más o menos regular. La serie comienza en el 18 de febrero del año 2000, es decir en invierno y finaliza el 13 de Marzo del año 2010 prácticamente en los albores de la primavera. Por tanto, se dispone para cada año de una serie de imágenes relativas a distintas épocas del mismo. El hecho de indicar las fechas de las imágenes, así como su distribución en el tiempo se justifica porque en el estudio se utilizan índices de vegetación y como es lógico, en un clima más o menos continental como es el caso de la región bajo estudio, las variaciones de vegetación son significativas en función de las diferentes estaciones climatológicas. Esto permitirá analizar el comportamiento de los descriptores de textura bajo la perspectiva de la vegetación según las estaciones referidas.

Como se ha mencionado en la introducción, el origen de esta investigación proviene del interés relativo al estudio de vegetación desde el punto de vista de su análisis temporal, suscitado y promovido dentro del Grupo de Investigación denominado Ecología y Paisaje perteneciente a la Escuela Superior de Ingenieros de Montes en la Universidad Politécnica de Madrid. Las imágenes procedentes de MODIS y los resultados del cálculo de los índices de vegetación mencionados previamente son cortesía del citado grupo, que se ha prestado a ofrecérmolas sin

más contrapartida que el interés que de este análisis pudiera derivarse en relación a estudios de texturas naturales desde el punto de vista de la evolución de la vegetación existente en la región objeto de estudio.

Los índices de vegetación en general y el utilizado en nuestros experimentos en particular, son indicativos de la presencia de vegetación en función del comportamiento espectral de las diferentes zonas. Dependiendo de la cantidad de vegetación, el tipo y las condiciones climatológicas transitorias o permanentes existente en una determinada región los valores del mencionado índice pueden variar significativamente de unas zonas a otras. Tal y como se ha puesto de manifiesto en la sección anterior, la literatura en relación a los índices de vegetación es muy abundante, habiéndose propuesto numerosos índices cada uno de los cuales proporciona información relevante respecto de la vegetación existente en una determinada zona, pudiendo variar desde una zona totalmente cubierta por especies vegetales a zonas desnudas de vegetación.

El objetivo de este trabajo se orienta al análisis de texturas en general, si bien los estudios llevados a cabo en nuestros experimentos se centran en texturas naturales conteniendo diversos tipos de vegetación como se indicará más adelante.

El índice de vegetación, NDVI, se calcula píxel a píxel de forma que para cada localización espacial de las bandas espectrales R y NIR se obtiene un valor NDVI, de suerte que el conjunto conforma una nueva imagen con la misma resolución espacial que las originales (R y NIR) conteniendo el mencionado valor NDVI.

A juzgar por lo expuesto hasta aquí, los mencionados índices proporcionan una información relevante en relación al contenido de vegetación en una zona píxel a píxel pero no informan sobre las relaciones espaciales existentes entre los píxeles en una localización espacial dada. Los descriptores de textura propuestos en este trabajo están orientados precisamente a realizar esta tarea.

Como se ha mencionado previamente, el objetivo de este trabajo de investigación se centra en el análisis de las texturas desde el punto de vista del análisis contextual o espacial, lo

que supone un complemento a la información proporcionada por los índices de vegetación, en concreto el NDVI que es el utilizado en este trabajo. Si bien la propuesta formulada puede extenderse sin ninguna restricción al análisis basado en otros índices de vegetación diferentes. Para llevar a cabo este análisis desde el punto de vista de las imágenes digitales se define lo que se conoce como entorno de vecindad o simplemente *vecindad* para simplificar. La vecindad se define alrededor de un determinado píxel y los que le rodean, hablándose de vecindad-8 cuando se trata de un píxel central y sus 8 vecinos, lo que hace un total de nueve píxeles. Este tipo de vecindad resulta ser de las más utilizadas en tratamiento de imágenes.

Es evidente, que desde esta perspectiva de vecindad, el tipo de estructuras y por tanto de vegetación existentes en las imágenes es determinante a la hora de obtener los resultados a través de los diferentes descriptores de textura analizados.

A modo de ejemplo supongamos una región caracterizada por la existencia de una masa forestal compuesta por árboles de hoja caduca, esto significa que durante el periodo invernal la ausencia de hojas producirá altos contrastes en las texturas relativas a las hojas de dichos árboles debido a que en las imágenes se entremezclan las ramas de los árboles con el suelo, presentando ambas muy diferentes signaturas espectrales, lo que se traduce en una alta variabilidad de los valores de los índices de vegetación en la vecindad analizada. Por el contrario, durante la época de primavera o estival, donde los árboles se encuentran totalmente cubiertos por hojas, en las imágenes sólo se apreciará una distribución más o menos homogénea en función de la densidad de hojas, de forma que si existe una alta cobertura vegetal, sólo aparecerán tonalidades verdes y por tanto una zona altamente homogénea.

De lo anterior se deduce que si bien el objeto de la investigación llevada a cabo en este trabajo, en relación a los descriptores de textura analizados, no tiene como objetivo el análisis directo de la vegetación, sí que de forma indirecta es posible determinar las variaciones temporales de las texturas existentes en las imágenes y por tanto las correspondientes variaciones asociadas a masas forestales, suelos y otras estructuras presentes en las imágenes.

Como fácilmente puede deducirse, en la Comunidad Foral de Navarra, existen diferentes tipos de texturas, centrando el interés de este estudio en texturas vegetales, debido al interés del grupo de investigación en este tema. No obstante, conviene añadir que los mencionados descriptores pueden aplicarse a cualquier otro tipo de texturas no necesariamente vegetales, lo que constituye un interés relevante adicional en relación a los descriptores aquí utilizados.

Dentro de las texturas de interés, objeto del análisis, destacan las que se relacionan a continuación, distinguiendo básicamente cuatro grupos, que se corresponden con otros tantos tipos de vegetación, obtenidos a partir del mapa de usos y aprovechamientos de la Comunidad Foral de Navarra. De cada grupo se han seleccionado únicamente los píxeles puros de MODIS. Estos cuatro grupos constituyen un objetivo primordial para su estudio debido al interés expuesto por parte del grupo de investigación anteriormente mencionado que ha propiciado y facilitado esta investigación.

**Grupo 1:** Cultivos de secano dominados principalmente por cereal. El ciclo fenológico del cereal está marcado por un patrón unimodal. A lo largo del otoño, como consecuencia de las primeras lluvias comienza a aparecer la vegetación herbácea, por lo que se observa un incremento en la actividad fotosintética, a lo largo del invierno. Como consecuencia de las bajas temperaturas las especies se encuentran en una fase de letargo. En el momento en que suben las temperaturas en primavera, la actividad fotosintética vuelve a incrementarse. Al final de la primavera o principio del verano las especies herbáceas se secan rápidamente debido a las altas temperaturas, finalizando el ciclo con la recolección del cereal, momento en el que sobre la superficie cultivada permanece el rastrojo como resultado de la cosecha del mismo. Es evidente que este tipo de vegetación presenta ciclos anuales claramente definidos. Desde el punto de vista del análisis de texturas a partir de las imágenes MODIS, la disposición vegetal de este tipo de cultivos se manifiesta de la siguiente manera. En primavera aparece totalmente verde, en verano muy seco con presencia de rastrojo, en otoño sólo se distingue el suelo desnudo debido a que sobre él ya se han realizado las labores agrícolas pertinentes encaminadas al inicio de un

nuevo ciclo de producción, comenzando a aparecer plantas verdes que no se desarrollan hasta finalizado el invierno.

**Grupo 2:** forestal no arbolado (matorral y pasto), es decir se caracteriza por la presencia de matorrales, pasto o mezcla de ambos, técnicamente conocido como monte bajo (el monte bajo significa que las especies brotan de cepa y no de semilla. Presenta otra característica y es el hecho de que existe una alta diversidad de plantas y por tanto con altos contrastes, lo que sin duda determinará una alta variabilidad de la textura en las regiones donde aparezca este tipo de vegetación.

**Grupo 3:** bosque de coníferas, caracterizado por ser especies de hoja perenne, que se mantienen fotosintéticamente activos a lo largo de todo el año, lo que se traduce en que presentan precisamente durante todo el año un cierto nivel de vegetación producido por las hojas que cubren los árboles. No obstante, dependiendo de la estación del año, se presentarán ciertas variaciones debido a las diferentes densidades de textura. Sobre el suelo aparece un tipo de vegetación conocido como sotobosque, que de alguna manera sigue un ciclo fenológico similar al de forestal no arbolado, pasando por diferentes fases a lo largo del año. Así, en primavera aparece sobre el suelo una alta densidad de vegetación, tanto mayor cuanto más abundantes hayan sido las lluvias en las estaciones de otoño-invierno, posteriormente en verano llega a agostarse para volver a regenerarse de nuevo a partir de otoño-invierno. Esta característica, va a determinar una cierta variación de las texturas observadas, tanto más acusada cuanto menor sea la cobertura o densidad de hojas producidas por las coníferas.

**Grupo 4:** son bosques de arbolado frondoso de hoja caduca, esto significa que en invierno carecen de hojas, mientras que en verano la densidad de hojas alcanza su máximo nivel. Durante las estaciones de transición, primavera y otoño, el nivel de cobertura de la masa forestal debe variar necesariamente e incluso de forma considerable y acusada.

Cada uno de estos grupos está perfectamente identificado espacialmente en las imágenes originales, existiendo varias zonas separadas a lo largo de las mismas. La identificación de los diferentes grupos ha sido realizada por los expertos en el grupo de investigación previamente mencionado en la Escuela de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. De esta forma, se conoce la localización espacial a nivel de píxel de las zonas pertenecientes a los cuatro grupos mencionados.

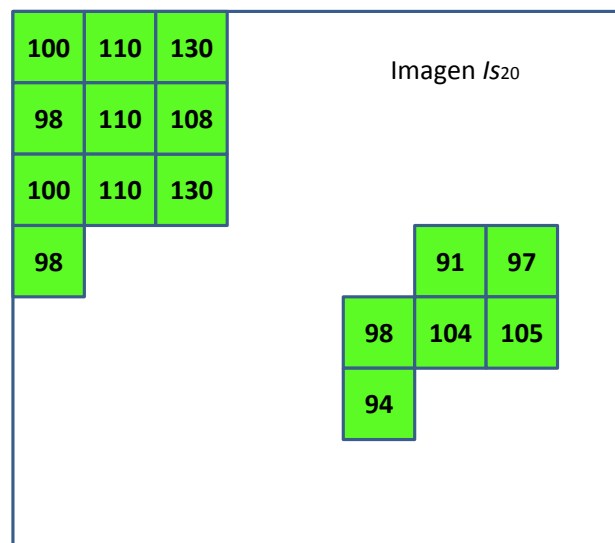
Naturalmente, dependiendo de la diversidad de factores climatológicos y medioambientales, lo que puede suponerse un comportamiento normal según la previsión temporal, pueden derivarse en diferentes comportamientos desde el punto de vista de los descriptores de textura analizados en este trabajo. A modo de ejemplo, supongamos que una masa forestal de coníferas está afectada por algún tipo de plaga de insectos que ha derivado en una disminución significativa de la cobertura vegetal. En este caso, los contrastes de textura pueden ser relativamente altos en comparación a la misma masa totalmente sana y con alta cobertura vegetal.

## **4.2. Procesamiento de las imágenes**

El procedimiento utilizado para el análisis de resultados se lleva a cabo como sigue:

- a) Se dispone de un conjunto de imágenes conteniendo los valores del índice de vegetación a nivel de píxel.
- b) Sobre cada una de las imágenes disponibles se aplican los cuatro operadores de textura identificados como de interés relevante en el estudio realizado, definidos a través de las ecuaciones (2.4) a (2.10). Por tanto, de esta forma, se obtiene a partir de la imagen original una imagen resultante por cada operador. Por consiguiente, para cada operador se dispone de 464 imágenes de resultados correspondientes a las mismas imágenes que conforman la serie temporal. En todos ellos la región de vecindad considerada para el análisis textural es de dimensión 3x3, es decir lo que en la literatura especializada se conoce como vecindad-8 (Pajares 2007). Este procesamiento se realiza con Matlab9b en un procesador Intel Core Duo.

c) Dado que se conoce la localización espacial de los píxeles de cada uno de los cuatro grupos, para cada imagen resultante de la aplicación de los descriptores, se crea un vector  $\mathbf{x}$  que contiene todos los valores generados por el operador correspondiente para un grupo dado. Con el fin de clarificar la situación, en la figura 3, se muestra un ejemplo ilustrativo. Consideremos la imagen número 20 de la secuencia de las 464 disponibles, que denominamos  $I_{20}$  sobre ella se ha aplicado el operador *suavidad de la textura*, obteniendo la imagen resultante  $I_{s20}$ . En dicha imagen se han representado dos localizaciones espaciales diferentes conteniendo píxeles del mismo grupo. A partir de ellas, el vector  $\mathbf{x}$  vendría dado como sigue:



### Figura 3. Ejemplo distribución píxeles en una imagen

A partir de  $x$  se calcula para este grupo y en esta imagen, el valor medio, así como los valores máximo y mínimo y la desviación estándar:

- Valor medio:  $m = 105.19$
- Desviación estándar:  $\sigma = 11.29$
- Máximo: 130
- Mínimo: 91

- d) Los píxeles pertenecientes a uno de los grupos (identificados utilizando el concepto de regiones de interés ROIs) en una imagen dada de la secuencia se seleccionan mediante la herramienta comercial ENVI (2011), con la que a su vez se calculan para dicho grupo los siguientes cinco valores: valor medio, máximo, mínimo, valor medio más la desviación estándar, valor medio menos la desviación estándar. Este proceso se repite para los cuatro grupos existentes y para todas y cada una de las imágenes de la secuencia. Finalmente, para cada grupo se representan gráficamente los cinco valores anteriores obtenidos con cada descriptor de textura para cada una de las imágenes. A partir de dichas gráficas, cabe la realización de los pertinentes análisis de textura para cada grupo y en relación a cada descriptor, que se realiza en la siguiente sección.

### **4.3 Descripción del comportamiento de los descriptores de textura**

A continuación se describe el comportamiento de los seis operadores en relación a cada uno de los cuatro grupos mencionados previamente.

En el eje  $x$  de las diferentes gráficas se representa el número de imagen dentro de la secuencia de las 464 disponibles, identificándose con la etiqueta “Band Number” tal y como lo proporciona ENVI. En el eje  $y$  aparecen los cinco valores mencionados anteriormente, donde el valor medio se representa en negro, los valores máximo y mínimo en rojo, apareciendo dos trazas por encima y por debajo respectivamente de los valores medios. Los valores medios con la desviación estándar sumada o restada se representan en verde, apareciendo igualmente dos líneas por encima y por debajo de los valores medios.

Es bien sabido, que los diferentes descriptores proporcionan valores diferentes para la misma textura. No obstante, ENVI realiza un proceso de normalización en el rango  $[0, 255]$ .

De todos ellos, desde el punto de vista del análisis de texturas realizado en este trabajo, es el valor medio el verdaderamente relevante y sobre el que se realiza la interpretación y comportamiento de los descriptores sobre cada grupo analizado. Este valor se representa



mediante las correspondientes líneas de trazado blanco que aparecen en las correspondientes gráficas.

A continuación se valoran los resultados obtenidos en los cuatro grupos de interés, teniendo en cuenta el comportamiento de los descriptores de textura en las vecindades de los píxeles. Conviene recordar que dichos descriptores son de naturaleza estadística, siendo su comportamiento el que se describe seguidamente.

## **1. Media**

Dado un píxel y su entorno de vecindad este descriptor calcula el valor medio del índice de vegetación en dicha vecindad, asignando el valor obtenido al píxel central. Dado que las imágenes sobre las que se aplica contienen índices de vegetación, su comportamiento hace que el valor del píxel central disminuya su valor si es alto en relación al resto de píxeles o lo aumente si es bajo. En definitiva, proporciona el valor medio del índice de vegetación en la vecindad. Desde el punto de vista de nuestro análisis vegetal, esto significa que los valores, aunque en promedio, proporcionados por el descriptor serán relativamente altos cuando se trate de una zona con valores altos en los índices de vegetación y viceversa. La media no es en realidad un descriptor de textura sino que nos informa sobre el valor medio del índice de vegetación en la región, siendo útil realmente a la hora de proporcionar una idea aproximada de los valores del índice de vegetación.

## **2. Desviación estándar**

Este descriptor mide las desviaciones con respecto a la media de los índices de vegetación en el entorno de vecindad considerado. Esto significa que si en la ventana aparecen valores con índices de vegetación muy diferentes, la desviación estándar será alta, indicando en este caso que se trata de una zona con alta variabilidad en el índice de vegetación y por tanto que se trata de una región no homogénea. Por el contrario cuando se aplica sobre una región homogénea, los valores de los índices de vegetación son

similares y en el caso extremo todos iguales en la ventana considerada, en cuyo caso la desviación típica es nula.

### 3. **Suavidad de la textura**

Este descriptor se define en función de la varianza o lo que es lo mismo de la desviación estándar al cuadrado. Tal y como está definido, para regiones homogéneas, es decir con índices de vegetación similares, su valor se aproxima a cero siendo exactamente nulo cuando todos los píxeles en el entorno de vecindad poseen el mismo valor. Por el contrario, para regiones no homogéneas, con alta variabilidad de los índices de vegetación en la ventana considerada, su valor tiende a uno. Por tanto, este índice varía realmente en el rango  $[0,1]$  de suerte que valores bajos marcan una textura homogénea y altos no homogénea. Su comportamiento debe ser muy similar al de la desviación estándar.

### 4. **Momento de orden tres**

Se trata de un descriptor estadístico definido también como el promedio de las desviaciones de los valores de los índices de vegetación con respecto a la media dentro del entorno de vecindad considerado. No obstante, estas desviaciones se encuentran elevadas a una potencia al cubo, pudiendo aparecer valores tanto positivos como negativos, de suerte que al sumarse pueden compensarse unos con otros hasta tomar el valor cero si la compensación es máxima o bien tomar valores positivos o negativos dependiendo de cuál sea el signo de las desviaciones. Por este motivo no es posible definir un comportamiento apropiado de este operador, razón por la cual no se considera en el análisis llevado a cabo en este trabajo.

### 5. **Entropía**

Como ya se ha mencionado previamente, la entropía es una medida del desorden de un sistema físico. Esta idea trasladada al contexto de las imágenes nos permite deducir que cuando en un entorno de vecindad alrededor de un píxel existe un alto grado de

desorden, la entropía será mayor que cuando existe un cierto orden. Desde el punto de vista de la descripción de las texturas en relación a los índices de vegetación, sucede que a mayor contraste en el entorno de vecindad se dice que se produce un cierto desorden y por tanto alta entropía y viceversa, las regiones homogéneas se dice que presentan un cierto orden y por tanto, la entropía disminuye. En resumen, alto contraste o variabilidad en los índices de vegetación en la vecindad implica alta entropía y bajo contraste baja entropía. De nuevo, desde el punto de vista del análisis que nos compete en el presente trabajo de investigación, se sigue el mismo criterio que para la desviación estándar y la suavidad de la textura.

## 6. Uniformidad

La uniformidad resulta ser una medida directa de la suma de probabilidades al cuadrado. Supongamos una región homogénea donde todos los píxeles poseen el mismo valor del índice de vegetación. Esto significa que la probabilidad de obtener ese valor aumenta en relación a una región donde los valores de los índices son muy diferentes. El resultado se traduce en que la uniformidad es grande para regiones homogéneas y pequeña para regiones no homogéneas. Por tanto, su comportamiento es justamente el contrario que en el caso de los descriptores desviación estándar, suavidad de la textura y entropía. No obstante, con el fin de poder comparar mejor los resultados obtenidos, para este descriptor cuyo rango de valores varía en el intervalo  $[0,1]$ , se ha realizado una operación de diferencia con respecto a la unidad manteniendo la misma denominación de uniformidad, de esta forma las regiones homogéneas presenten valores bajos de uniformidad y las no homogéneas altos. Con ello el comportamiento debe ser similar al de la desviación estándar, la suavidad de la textura y la entropía en lo que al análisis de texturas se refiere.

En resumen, para el análisis que describimos en el siguiente apartado se procede de la siguiente manera:

- 1) Se estudia cada uno de los cuatro grupos por separado.

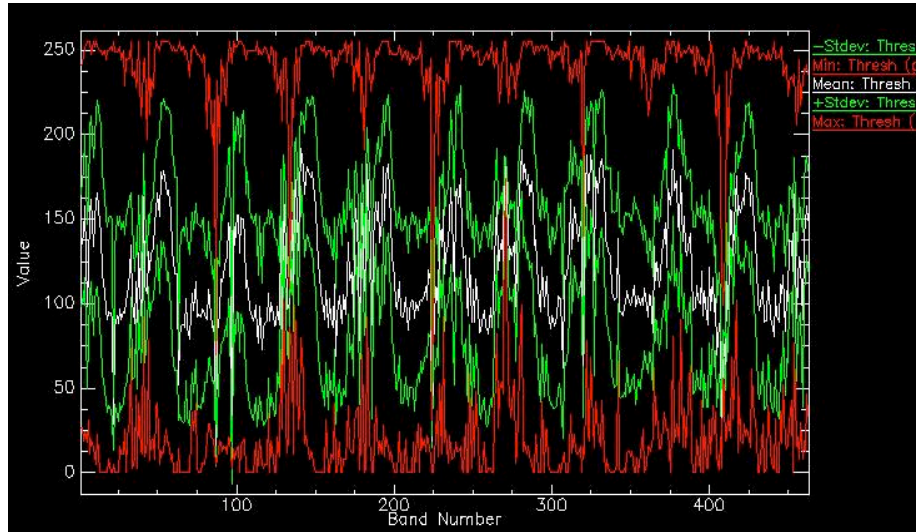
- 2) En cada grupo se analiza el comportamiento de los cuatro operadores de interés anteriormente mencionados, que caracterizan la textura, a saber: desviación estándar, suavidad de la textura, entropía y suavidad.
- 3) El criterio en relación a su comportamiento es que regiones homogéneas, es decir con índices de vegetación similares presentan valores más bajos en cualquiera de los cuatro descriptores que regiones no homogéneas y por tanto con valores en los índices de vegetación muy dispares.
- 4) El descriptor de la media se utiliza para medir los niveles de los índices de vegetación, no de la textura propiamente dicha.

## **4.4 Análisis de resultados**

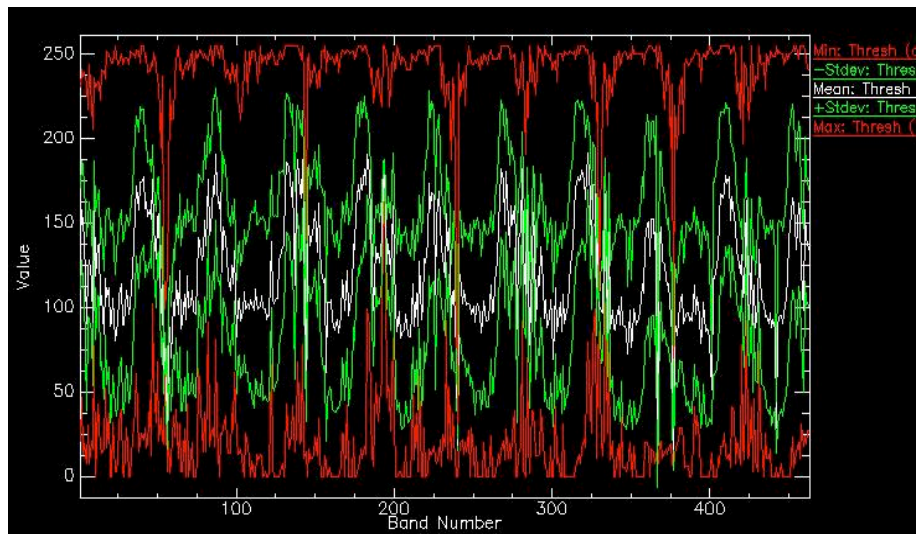
Antes de proceder al análisis de los resultados obtenidos es importante comentar que las imágenes procedentes de cualquier plataforma aerotransportada o de satélite tienen ruido debido al propio sensor, y también debido a los factores externos como pueden ser nubes, concentración de aerosoles, ruido sistemático conocido como “speckle” debido a las condiciones de vuelo u otros de diferente naturaleza. Debido a estos fenómenos los patrones que se analizan serán de carácter general, obviando los máximos y los mínimos, ya que dichos valores pueden ser resultado del ruido comentado anteriormente.

### ***4.4.1 Resultados para el grupo 1***

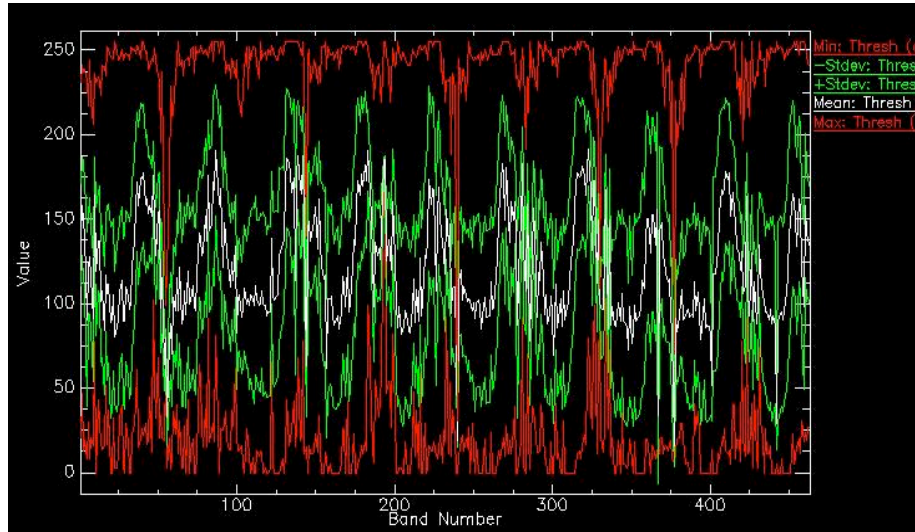
A continuación se representan gráficamente los resultados obtenidos para el primer grupo correspondiente a cultivos de secano principalmente de cereal. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos para la media estadística. Como se ha indicado previamente, la media y por tanto su gráfica correspondiente no representa un descriptor en sí mismo, si bien nos proporciona una idea general sobre el comportamiento que poseen los píxeles correspondientes a este grupo.



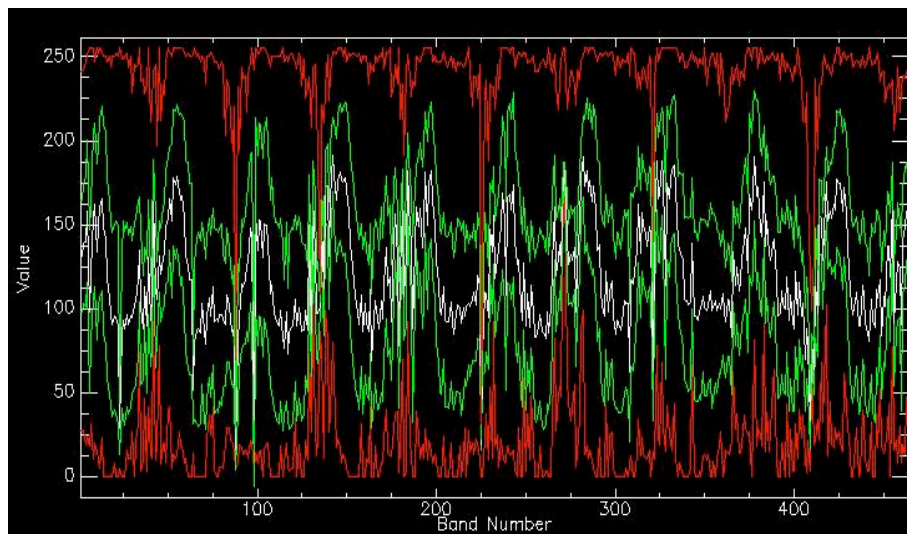
**Figura 4.** Gráfica correspondiente a la media para el grupo 1



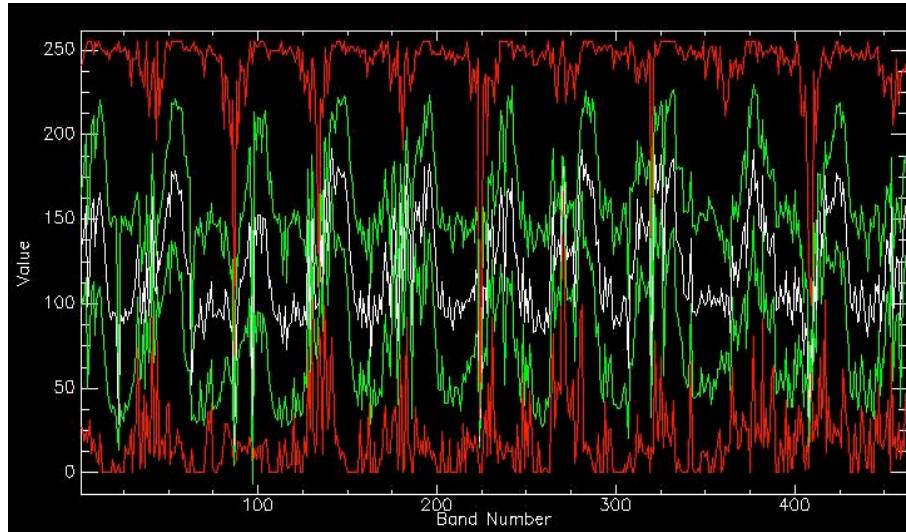
**Figura 5.** Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 1



**Figura 6.** Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo



**Figura 7.** Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 1



**Figura 8.** Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 1

A la vista de los resultados mostrados en las gráficas anteriores, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) La gráfica correspondiente al valor medio del índice de vegetación muestra variaciones oscilantes del mismo a lo largo de la serie temporal. Dichas variaciones se corresponden con los ciclos estacionales de los años naturales.
- b) Podemos observar que los cuatro descriptores de textura comienzan tomando valores bastante altos, esto se debe a que el inicio del muestreo coincide en los inviernos, cuando debido a las bajas temperaturas y condiciones climatológicas adversas nos encontramos una región relativamente poco homogénea, ya que el cultivo muestra escasa vegetación, y por lo tanto se aprecian por un lado parte de esa vegetación y parte del suelo sobre el que se encuentra.
- c) En los cuatro descriptores la vegetación presenta una serie de ciclos, disminuyendo a medida que las condiciones climatológicas van siendo más favorables desde el punto de vista de la actividad en la vegetación, y aumentando a medida que las condiciones se vuelven adversas. Esto último supone que este cultivo pierde su forraje o cobertura vegetal, en cuyo caso la región se hace menos homogénea; durante la primavera la vegetación característica de este grupo resulta ser en su mayor parte verde, lo cual hace

que la desviación entre los distintos píxeles alcance sus valores más bajos ya que se trata de una zona homogénea.

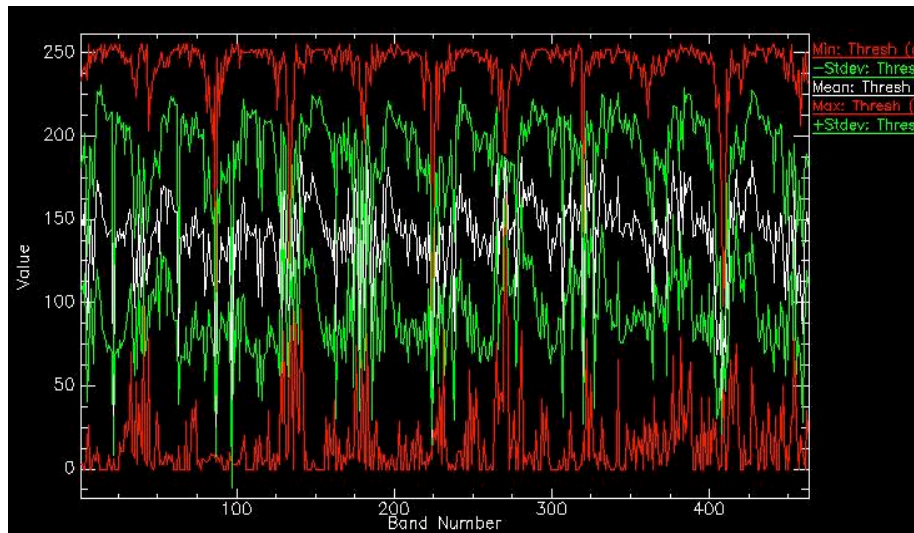
- d) En todas las gráficas el tercer pico alcanza valores significativamente menores que en el resto, esto puede deberse a que el invierno del año 2004 fuese algo menos extremo que en el resto de los años, lo cual supondría que este tipo de cultivo no habría perdido tanta cantidad de vegetación y por lo tanto la zona presentase un aspecto más homogéneo.
- e) Se observa que todos los descriptores en el segundo, tercer y noveno mínimo relativo toman valores muy cercanos a cero. No existe una explicación razonablemente convincente desde el punto de vista del análisis de la vegetación, por lo que cabe pensar que durante esos años lo más probable es que las imágenes obtenidas posean un cierto nivel de ruido, que se hizo claramente patente a la hora de ser tomadas. Esto explica el hecho de que pasen de valores muy cercanos a 0 a valores próximos a 100 en 1 ó 2 muestras.
- f) En las gráficas de uniformidad y entropía se observa un cierto desfase en relación a las de la desviación estándar y suavidad de la textura. Así, mientras en las primeras aparecen pendientes positivas o ascendentes, en las segundas este ascenso no se manifiesta, llegando incluso a invertirse la pendiente. Esto indica claramente que algunos filtros responden antes al cambio de textura que los otros, es decir son más sensibles a dichos cambios.
- g) Puede observarse cómo el descenso de heterogeneidad es mucho más brusco que el incremento, además, entre unos filtros y otros ese descenso no resulta ser de la misma naturaleza, o lo que es lo mismo se manifiesta más o menos suavemente. Por ejemplo con la desviación estándar el incremento y decremento de homogeneidad es similar, mientras que para el resto de descriptores, las disminuciones o incrementos resultan ser más suaves. Dicho de otro modo, el descriptor basado en la desviación estándar se comporta de forma similar tanto cuando se producen aumentos en la descripción de la textura como cuando se producen decrementos.

#### ***4.4.2 Resultados para el grupo 2***

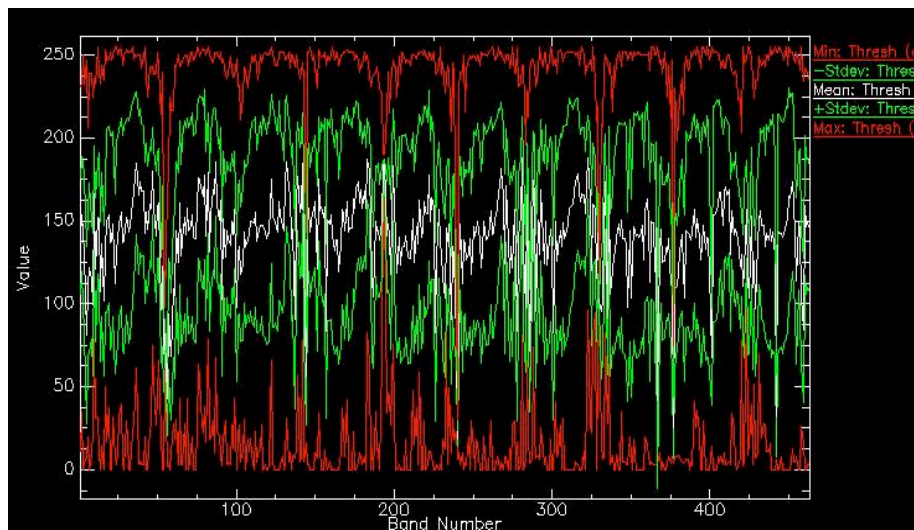
Como se ha mencionado previamente, a este grupo le corresponde un tipo de vegetación de tipo forestal no arbolado. Como en el caso del grupo 1, a continuación se muestran los



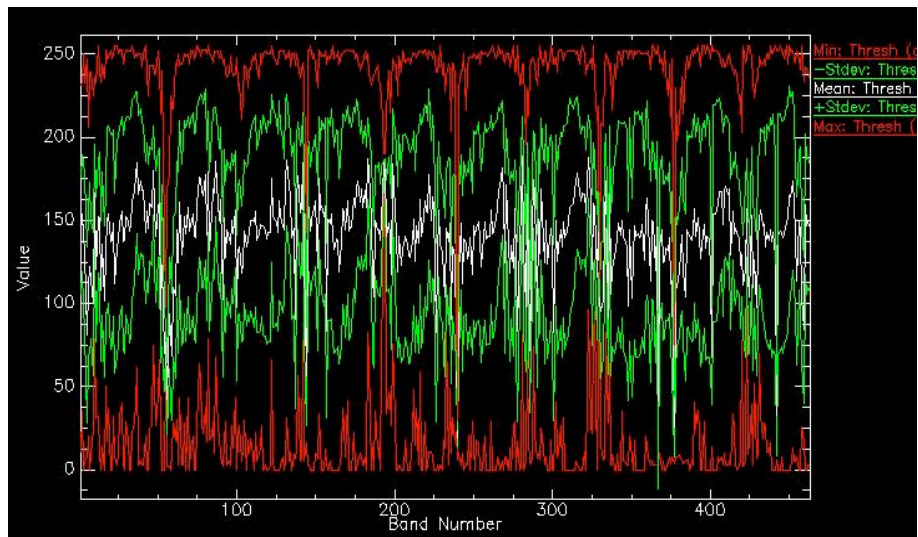
resultados correspondientes al valor medio en la figura 9, mientras que en las figuras 10 a 13 aparecen los resultados relativos a los cuatro descriptores analizados: desviación estándar, suavidad de la textura, entropía y uniformidad.



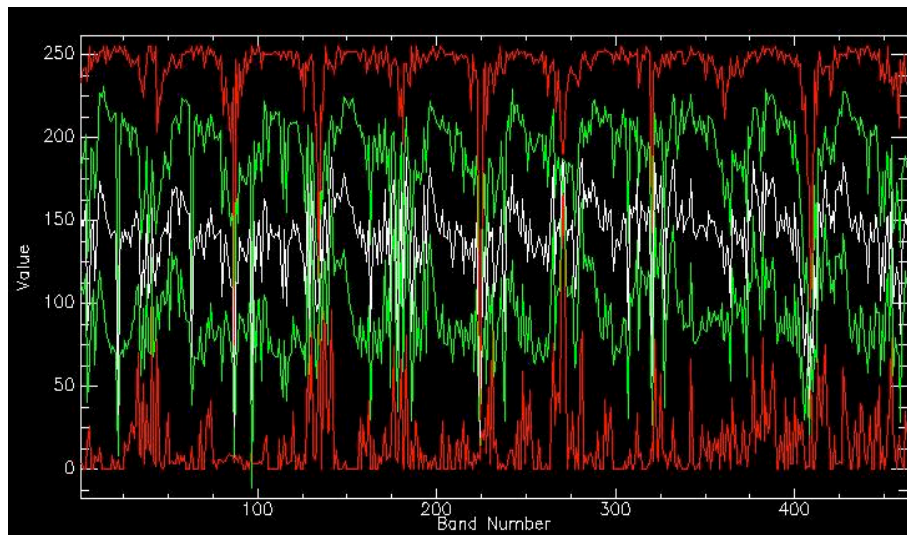
**Figura 9.** Gráfica correspondiente a la media para el grupo 2



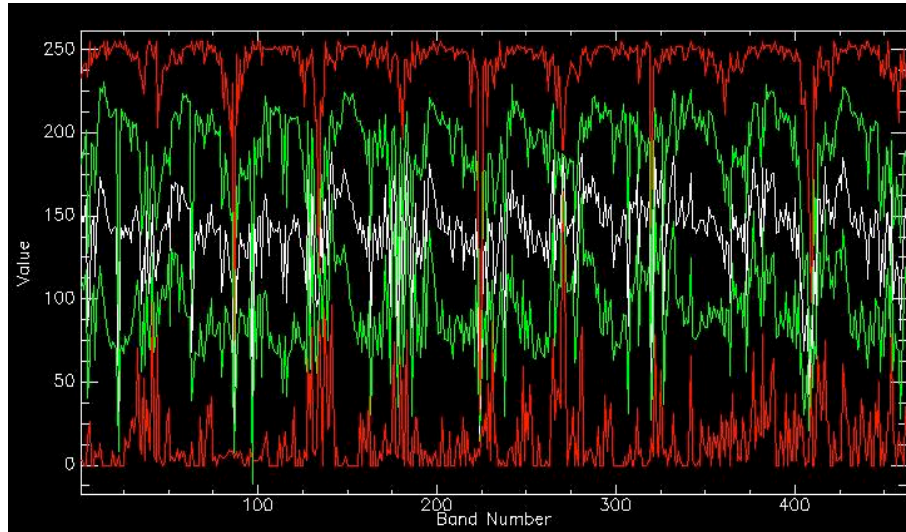
**Figura10.** Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 2



**Figura11.** Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 2



**Figura12.** Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 2



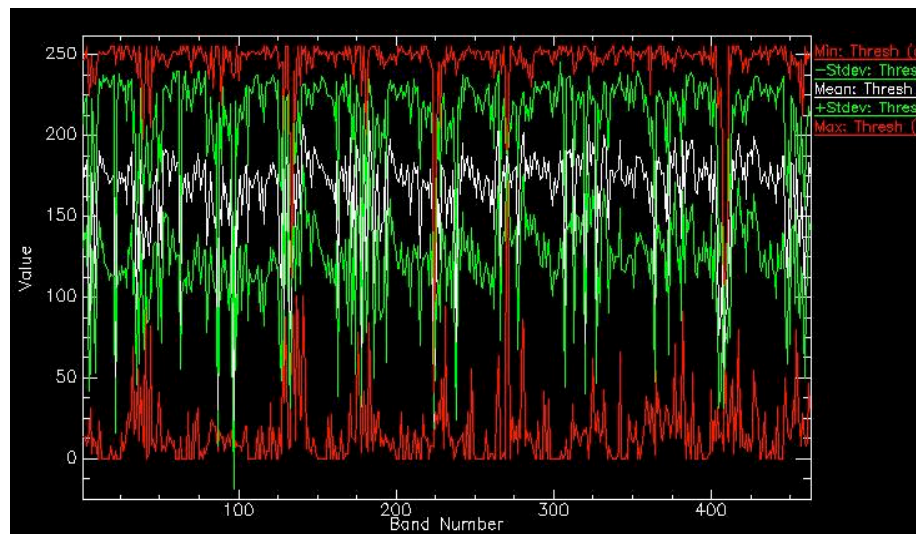
**Figura13.** Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 2

A la vista de los resultados obtenidos para este grupo de vegetación cabe inferir las siguientes conclusiones:

- a) Al igual que en el caso del grupo 1, aparecen ciclos repetitivos a lo largo de los años, tanto en los valores de la media como en lo que se refiere a los cuatro descriptores de texturas. Esto sin duda se debe a la variación de las condiciones climatológicas de forma cíclica a lo largo del año, determinado de forma natural por los cambios climatológicos en razón de las cuatro estaciones anuales.
- b) Para este tipo de vegetación destaca el hecho de que las variaciones cíclicas anteriormente mencionadas no son tan acusadas como en el caso de la vegetación asociada al grupo 1. En efecto, se observa de forma general la aparición de valores en el rango 100-150 a lo largo de todos los años. Esto es debido a que se trata de una vegetación intrínsecamente heterogénea al estar constituida por una mezcla de pastos y matorral y sus variaciones son menos expresivas independientemente de los cambios climatológicos estacionales.
- c) Se observa igualmente cómo, para los cuatro descriptores, los valores máximos para los tres primeros periodos cíclicos son menos significativos que para el resto. Este comportamiento puede deberse a que para este tipo de vegetación las condiciones climatológicas no le afectaron tanto durante los 3 primeros inviernos, presentando valores menores, lo que nos indica que el terreno o suelo presentaba un mayor grado de homogeneidad que en los siguientes años.

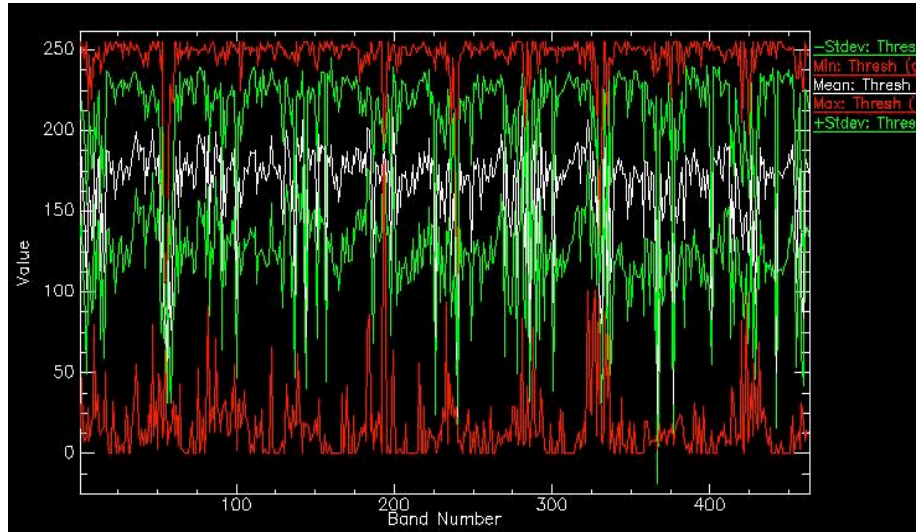
#### 4.4.3 Resultados para el grupo 3

Tal y como se ha mencionado previamente, la vegetación correspondiente a este grupo se caracteriza por el hecho de que se trata de coníferas (pinos) de hoja perenne. Intuitivamente de esta circunstancia se desprende el hecho de que van presentar un cierto nivel de vegetación a lo largo de las diferentes etapas estacionales. Acusándose niveles mayores o menores de forma sistemática en función de las variaciones climatológicas.

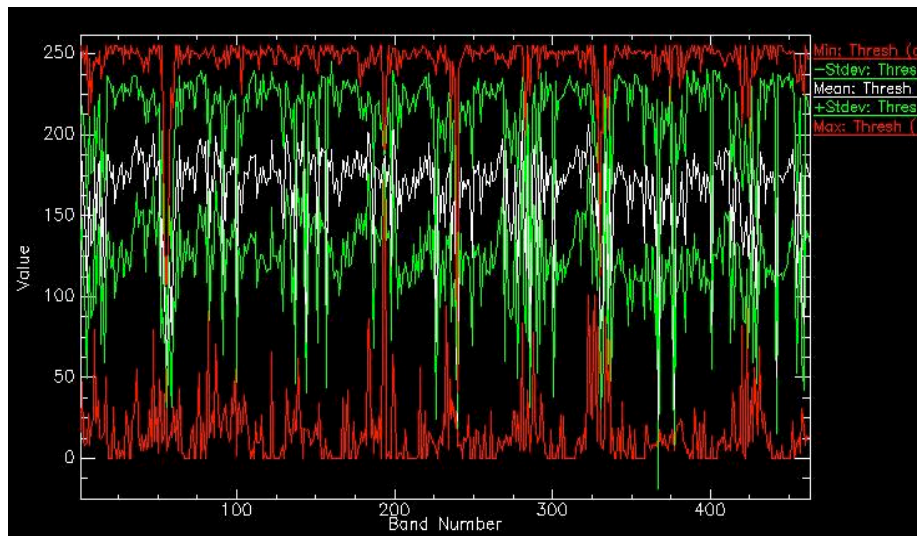


**Figura14.** Gráfica correspondiente a la media para el grupo 3

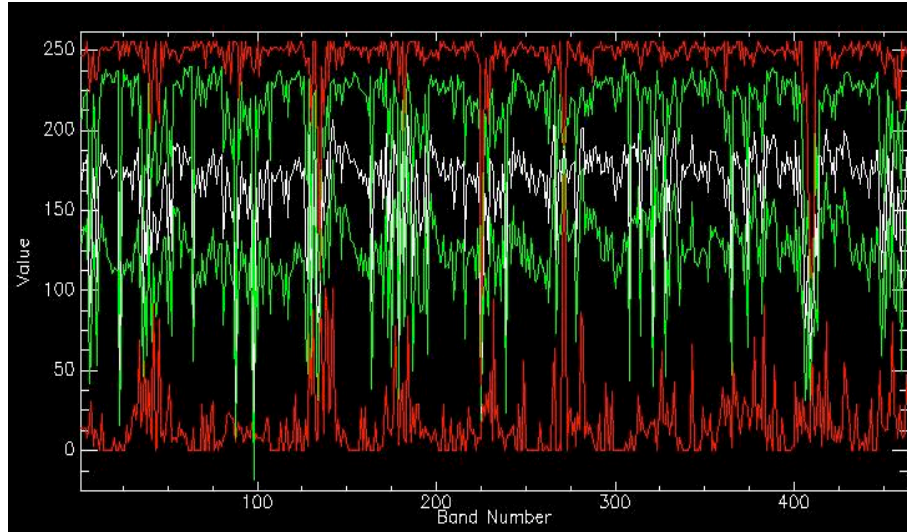




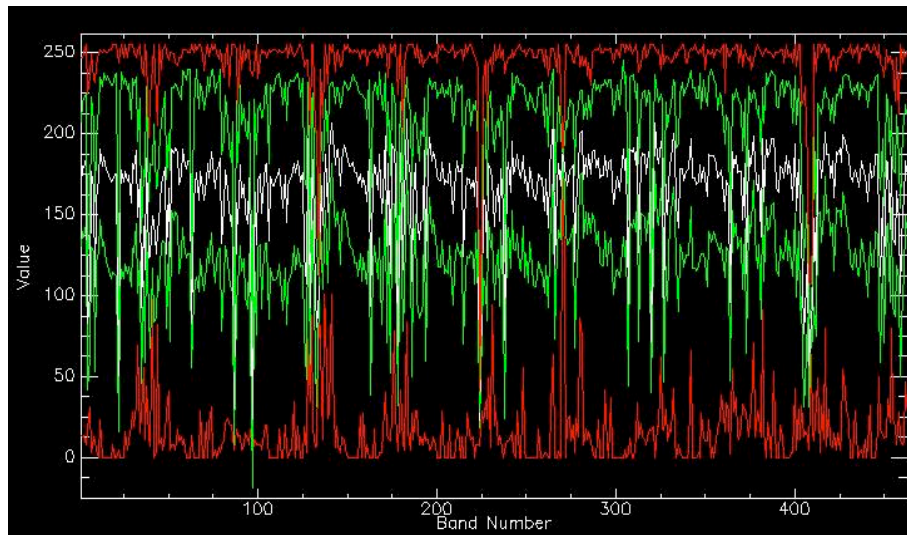
**Figura15.** Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 3



**Figura16.** Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 3.



**Figura17.** Gráfica correspondiente a la entropía para el grupo 3



**Figura18.** Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 3.

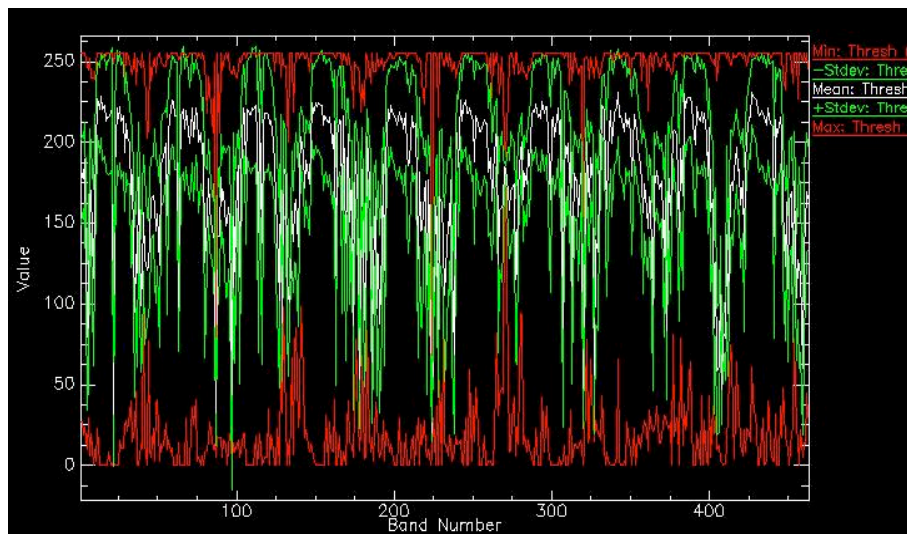
Analizando las gráficas anteriores podemos observar las siguientes características que se presentan para este grupo de vegetación:

- a) Como en los anteriores casos los cuatro descriptores, junto con la media presentan variaciones periódicas en el índice de vegetación. De nuevo vuelve a ponerse de manifiesto el hecho ya mencionado previamente respecto de que las variaciones estacionales van a influir en los diferentes niveles de textura.

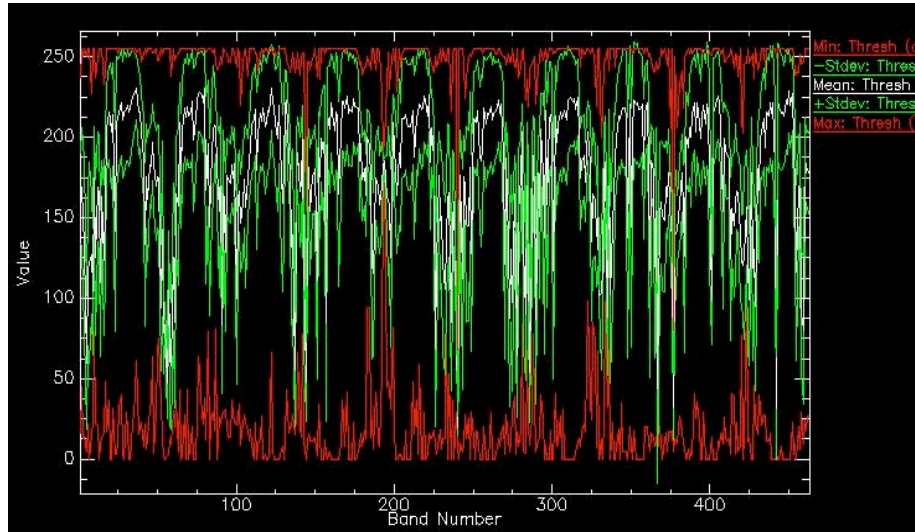
- b) Aunque bien es cierto que al tratarse de árboles con hoja perenne, éstos presentan hojas a lo largo del todo el año, sin embargo suelen ser masas arbóreas abiertas que dejan claros entre la cobertura de las copas de los pinos donde aparece con claridad el sotobosque prácticamente a nivel del suelo.
- c) Al tratarse de este tipo de árboles, en el suelo situado debajo de ellos no se encuentra demasiada vegetación por lo que de ahí obtenemos esos valores tan altos en los cuatro descriptores, lo que nos indica una zona altamente heterogénea durante todo el año.

#### ***4.4.4 Resultados para el grupo 4***

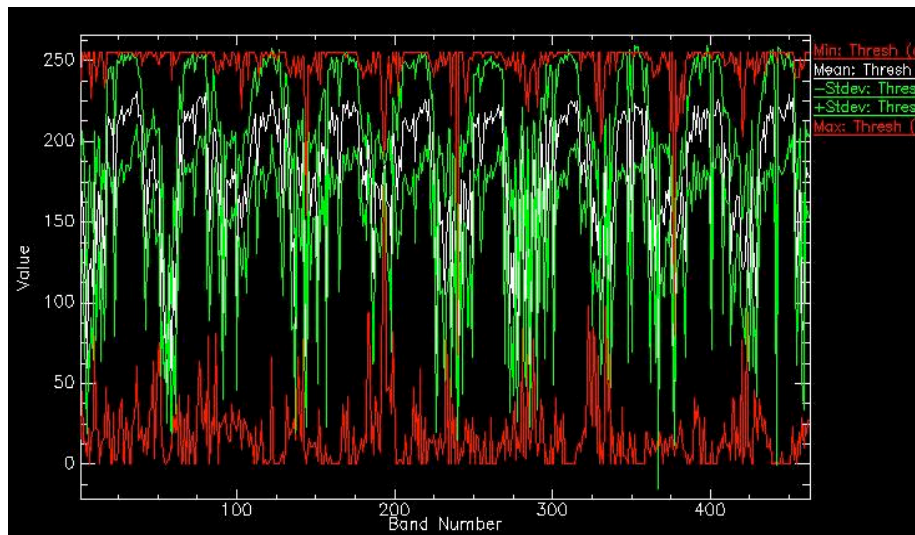
La vegetación perteneciente a este grupo se corresponde con bosques de frondosas de hoja caduca, lo que significa que durante los periodos estacionales en los que conservan las hojas presentarán elevados índices de vegetación en contraste con aquellos otros en los que carecen de las mismas. Naturalmente, los periodos de mayor índice de vegetación se corresponden con las épocas de primavera y verano y los de menor con otoño donde comienzan a perderla e invierno durante el cual carecen por completo de hojas. En este último caso llegan a ser visibles las estructuras del suelo con el consiguiente contraste de textura frente a la frondosidad que exhiben en las estaciones de abundancia de hoja en las que la homogeneidad de las texturas llega a ser una constante que las define.



**Figura19.** Gráfica correspondiente a la media para el grupo 4

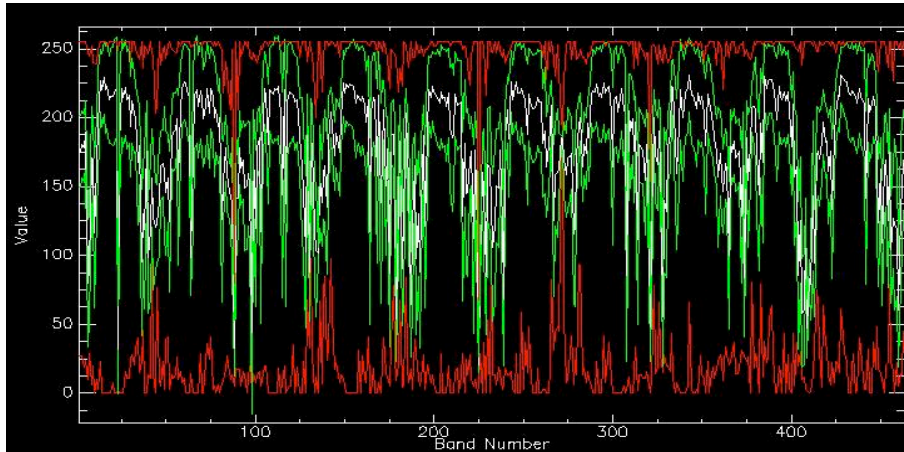


**Figura20.** Gráfica correspondiente a la desviación estándar para el grupo 4

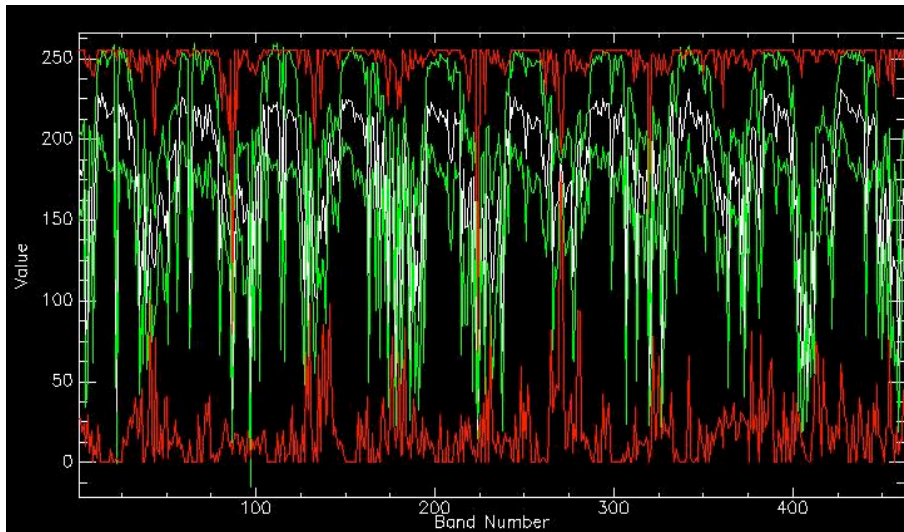


**Figura21.** Gráfica correspondiente a la suavidad de la textura para el grupo 4





**Figura22.** Gráfica correspondiente a la entropía para grupo 4



**Figura23.** Gráfica correspondiente a la uniformidad para el grupo 4

El análisis de las gráficas anteriores para el tipo de vegetación correspondiente a este grupo 4, permite deducir lo siguiente:

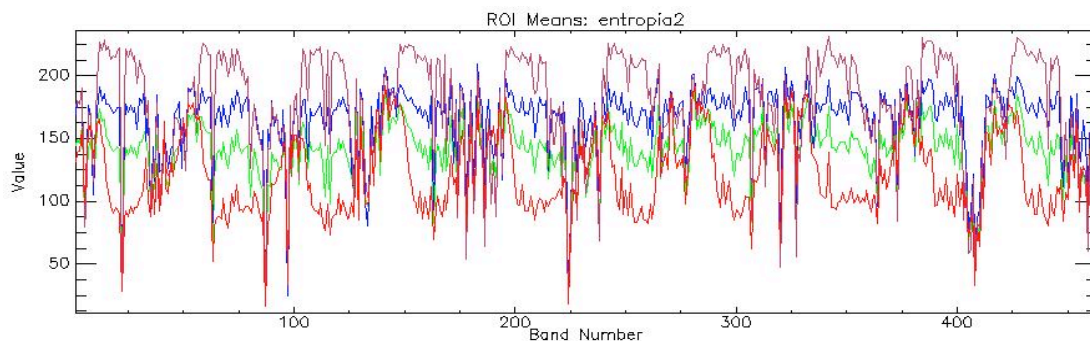
- a) Se observa la existencia de ciclos, que se repiten coincidiendo con las mismas estaciones en los diferentes años. Los valores medios presentan valores altos durante la época de cobertura vegetal, descendiendo a niveles inferiores en el resto de los periodos estacionales. La variación cíclica se pone igualmente de manifiesto en relación al comportamiento de los descriptores de textura.

- b) Este tipo de vegetación exhibe valores altos de textura durante periodos de tiempo significativamente amplios, lo que quiere decir que a pesar de la frondosidad y su alto nivel de vegetación, la realidad es que las texturas que describen aparecen con valores importantes. La explicación se debe a que este tipo de vegetación caducifolia también tiene asociado sotobosque, particularmente pasto, por tanto en verano la masa arbórea aparece verde, mientras el pasto asociado ya se ha secado. Esta situación se vuelve a producir de manera inversa en otoño, lo que implica que haya más heterogeneidad que en los pastos que o bien está todo verde o todo seco.
- c) Solamente aparecen valores bajos en los descriptores, correspondiendo a zonas homogéneas, cuando la hoja y el sotobosque poseen signatures espectrales similares, en ambos casos verdes, lo que se corresponde principalmente con los periodos primaverales.

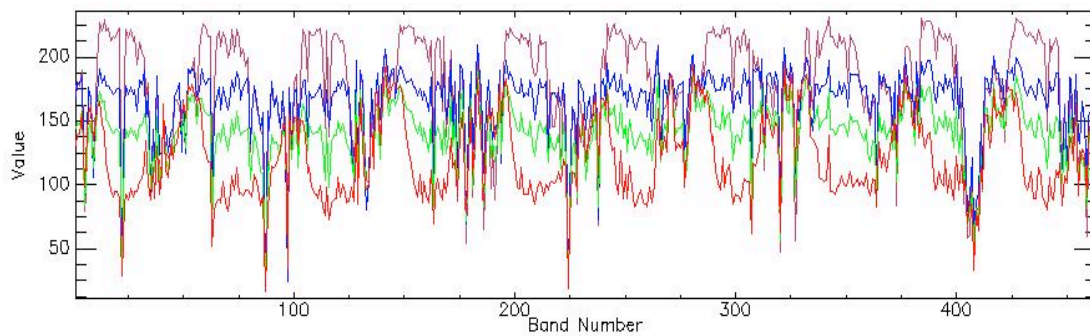
#### ***4.4.5 Análisis conjunto de descriptores***

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de los cuatro descriptores de textura estudiados de forma individual para cada uno de los cuatro grupos de vegetación.

Comparativamente hablando, el comportamiento de los cuatro descriptores resulta ser muy similar. En las gráficas mostradas en las figuras 24 y 25 se representa dicho comportamiento de la entropía y la uniformidad respectivamente.



**Figura 24** Representación gráfica del descriptor entropía para los cuatro grupos de vegetación.



**Figura 25.**Representación gráfica del descriptor uniformidad para los cuatro grupos de vegetación.

A partir de los resultados mostrados en sendas gráficas se puede inferir lo siguiente:

- a) Destaca principalmente el hecho de que en ambos casos, los niveles mostrados que aparecen en los grupos de cultivos (línea roja) y frondosas (línea morada) son ciertamente diferentes, apareciendo valles y picos respectivamente. Durante los valles y los picos aparece un comportamiento relativamente estable. Recordando que valores altos representan texturas de alto contraste y viceversa, es evidente que un mismo descriptor es capaz de discernir entre estos dos tipos de texturas.
- b) En relación a los grupos de coníferas y matorral no arbolado, el comportamiento de los dos descriptores anteriores presenta variaciones menos significativas, aunque con un alto nivel de variabilidad a lo largo de la serie temporal. Este comportamiento se asocia con el hecho de que los niveles de textura se mantienen más o menos estables en el tiempo y a lo largo de los años, salvo algunas excepciones en los que aparecen marcados descensos con duración relativamente corta.
- c) En el caso de los dos mismos grupos del punto anterior destaca el hecho de que el comportamiento de los dos descriptores es muy similar, pudiéndose hablar de que las variaciones de una son la réplica de la otra, si bien con niveles de textura ligeramente superiores en el caso de las coníferas.

#### ***4.4.6 Consideraciones generales***

A la vista de los resultados obtenidos previamente, como conclusiones de carácter general se pueden mencionar las siguientes:

- a) Los descriptores de textura analizados son capaces de capturar las diferentes variaciones de textura en función de la vegetación existente y según los ciclos estacionales a lo largo de los diferentes años bajo estudio.
- b) Los descriptores son capaces de identificar perfectamente los cambios estacionales, según los ciclos vitales del desarrollo de las masas vegetales, permitiendo describir las texturas desde el punto de vista de su homogeneidad según los citados ciclos.
- c) Los cuatro descriptores analizados presentan comportamientos similares frente a las diferentes texturas, sin destacar ninguno de ellos de forma específica. Esto lleva a pensar que los cuatro captan del mismo modo los diferentes tipos de texturas, lo cual parece lógico desde el punto de vista de su naturaleza estadística en todos los casos.

## **Capítulo 5 - Conclusiones y líneas de trabajo futuras**

### **5.1 Conclusiones**

En este trabajo se ha analizado el comportamiento de cuatro descriptores estadísticos de textura en otros tantos tipos de vegetación correspondientes a distintas zonas de la Comunidad Foral de Navarra.

Estos descriptores se han utilizado tradicionalmente en imágenes capturadas con sensores operando en longitudes de onda correspondientes al espectro visible, hasta donde se ha podido comprobar no se han aplicado al análisis de texturas desde el punto de vista de la vegetación, particularmente en el caso de las imágenes procedentes de la plataforma MODIS. Este hecho en sí mismo constituye una importante contribución en el campo del análisis de texturas vegetales, que permiten la realización de estudios en el terreno agrícola y forestal.

Se ha comprobado que los descriptores analizados son capaces de discernir entre los tipos de textura estudiados, originados por la naturaleza de las mismas y su comportamiento a lo largo de los ciclos estacionales en el tiempo. Esto posibilitará sin duda el análisis de diferentes tipos de texturas de masas de vegetación aún sin conocer de antemano su naturaleza.

Como colofón, cabe destacar el hecho de que la investigación desarrollada surge ante una necesidad concreta suscitada por el grupo de investigación citado en la introducción; gracias a la misma se han analizado los mencionados descriptores, proponiéndose como herramientas tecnológicas informáticas puestas al servicio de la comunidad científica en el ámbito del análisis agrícola y forestal como ayuda al análisis e interpretación de las masas vegetales tanto desde el punto de vista de cultivos agrícolas como áreas forestales.

Aunque los descriptores se han aplicado al estudio de cuatro grupos de texturas, sin duda sus características permitirán su aplicación para la descripción de otros tipos de texturas, incluso en ámbitos diferentes al agrícola y forestal. Es más, se abre la posibilidad para su

aplicación a imágenes procedentes de otros tipos de sensores diferentes a la plataforma MODIS, de naturaleza aeroespacial.

## **5.2 Líneas de trabajo futuras**

A continuación propondremos posibles líneas de investigación futuras para continuar con este trabajo de investigación, lo que permite dar continuidad al mismo:

- Analizar aquellos píxeles que pertenezcan a masas vegetales con mezclas de diferente vegetación, y comprobar si se pueden diferenciar zonas que posean esas diferencia como por ejemplo conífera y frondosa, o pasto y conífera.
- Examinar la proporción de mezcla de las distintas zonas, ya que gracias a los análisis de textura se pueden identificar diversos tipos de mezcla de grupos de vegetación.
- Analizar las zonas en las cuales se detecten cambios de uso del terreno, permitiendo así comprobar el cambio de textura a lo largo del tiempo.
- Ampliar el estudio para analizar el comportamiento de otros descriptores de textura de naturaleza diferente a la estadística, incluyendo aquellos otros que son capaces de capturar estructuras geométricas de las texturas tales como los filtros de Gabor o basados en wavelets a través de la aplicación de filtros direccionales. De esta forma, quizás podrían identificarse zonas de cultivo por la aparición en ellas de las líneas de cultivo o surcos, que los caracterizan frente a estructuras amorfas y sin ningún tipo de disposición geométrica.

## Referencias

1. Arkar, A., Sharma, K.M.S., Sonak, R.V. (1997). A new approach for subset 2-D AR model identification. *IEEE Trans. Image Process.* 6, 407–413.
2. Ashjari, B. (1982). Singular Value Decomposition Texture Measurement for Image Classification, PhD thesis, University of Southern California, Los Angeles, CA.
3. Arivazhagan, S., Ganesan, L. (2003). Texture classification using wavelet transform. *Patt. Rec. Lett.* 24, 1513–1521.
4. Bharati, M.H., Liu, J.J., MacGregor, J.F. (2004) Image texture analysis: methods and comparisons. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 72, 57-71.
5. Boatwright, G.O.; Whitehead, V.S. (1986). Early warning and crop condition assessment research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1986, 24, 54-64.
6. Bovik, A., Clark, M., Geisler, W. (1990) Multichannel texture analysis using localized spatial filters. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 12, 55–73.
7. Bruzzone L, Fernández-Prieto D. (2000a) An adaptive parcel based technique for unsupervised change detection. *Int J Remote Sensing* 21(4), 817–822.
8. Bruzzone L, Fernández-Prieto D. (2000b) Automatic analysis of the difference Image for unsupervised change detection. *IEEE Trans. Geosci Remote Sensing* 38(3), 1171–1182.
9. Bruzzone L, Fernández-Prieto D (2002) An adaptive semiparametric and context-based approach to unsupervised change detection in multitemporal remote-sensing images. *IEEE Trans. Image Process* 11(4), 452–466.
10. Bucha, T., Stibig, H.-J. (2008). Analysis of MODIS imagery for detection of clear cuts in the boreal forest in north-west Russia. *Remote Sens. Environ.* 112 (5), 2416–2429.
11. Canadian Center for Remote Sensing (2011). Accesible on-line <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

12. Carlucci, L. (1972). A formal system for texture languages. *Pattern Recognition*. 4, 53–72.
13. Chan, J.C.-W., DeFries, R.S., Xiwu, Zhan, Chengquan, Huang, Townshend, J.R.G. (2000). Texture features for land cover change detection at 250 m resolution – an application of machine learning feature subset selection. *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. IGARSS 7*, 3060–3062.
14. Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*, Rialp SA. Madrid
15. Cross, G., Jain, A. (1983). Markov random fields feature models. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 5, 25– 39.
16. ENVI (2011) <http://www.itervis.com/ProductsServices/ENVI.aspx>
17. Esser C. A., Ortega B. R. (2003). Uso de percepción remota o teledetección para el manejo sitio-específico de viñedos. *Revista Agronomía y Forestal UC*. 19
18. Galford, G.L., Mustard, J.F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P. (2008). Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment* 112, 576–587.
19. Geladi, P. (1992). Image classification using Multi-way Principal Component Analysis (MPCA) on 2-D. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.* 14, 375–390.
20. Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (2008). (2008). *Digital Image Processing*, 3rd Ed., Prentice-Hall, New Jersey, USA
21. Group on Earth Observations (2007). Report from the Workshop on Developing a Strategy for Global Agricultural Monitoring in the framework of Group on Earth Observations (GEO), 16-18 July 2007, FAO, Rome; GEO: Geneva, Switzerland, 2007.
22. Haralick, R.M, Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 3, 610–621.



23. Huesca, M. (2007). Diseño de un índice dinámico de riesgo de incendios forestales basados en el Fire potential Index de Burgan. Proyecto fin de Carrera. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
24. Hüttich, C., Gessner, U. Herold, M., Strohbach, B.J., Schmidt, Keil, M. and Dech, S. (2009). On the Suitability of MODIS Time Series Metrics to Map Vegetation Types in Dry Savanna Ecosystems: A Case Study in the Kalahari of NE Namibia, Remote Sensing, 1, 620-643.
25. Indhal, U., Næs, T., (1998). Evaluation of alternative spectral feature extraction. Chemometr. Intell. Lab. Syst. 12 (1998) 261–278.
26. IKONOS (2011). <http://www.satimagingcorp.com/gallery-ikonos.html> (disponible on-line).
27. ISCAR (2010) (Ingeniería de Control, Sistemas, Automática y Robótica) <http://www.dacya.ucm.es/area-isa/index.php?page=home>).
28. Keller, J.M., Chen, S., Crownover, R.M. (1989). Texture description and segmentation through fractal geometry. Comput. Vis. Graph. Image Process., 45, 150–166.
29. Kvaal, K., Wold, J.P., Indhal, U.G., Baardseth, T., Næs (1998). Multivariate feature extraction from textural images of bread. Chemometr. Intell. Lab. Syst. 42, 141–158.
30. Koffka, K. (1935). Principles of Gestalt Psychology. New York: Harcourt.
31. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 24, pp. 65-75, 1986.
32. Kruizinga, P., Petkov, N., Grigorescu, S.E. (1999) Comparison of texture features based on Gabor filters. in: Proc. of the 10th International Conference on Image Analysis and Processing. Venice, Italy, September 27–29, pp. 142–147.
33. MATLAB. (2011). The Mathworks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (disponible on-line).

34. MODIS-NASA (2011). <http://modis.gsfc.nasa.gov/> (disponible on-line)
35. National Agricultural Statistics Service (2010). Cropland Data Layer; USDA-NASS: Washington, DC, USA, 2010; Available online: [www.nass.usda.gov/research/Cropland/SARS1a.html](http://www.nass.usda.gov/research/Cropland/SARS1a.html)
36. Ouma, Y.O., Ngigi, T.G., Tateishi, R. (2006). On the optimization and selection of wavelet texture for feature extraction from high-resolution satellite imagery with application towards urban – tree delineation. *Int. J. Remote Sens.* 27 (1), 73–104.
37. Pajares, G. (2006) A Hopfield Neural Network for Image Change Detection. *IEEE Trans. Neural Networks*, 17(5), 1250-1264.
38. Pajares, G., de la Cruz, J.M. (2007a). *Visión por Computador: imágenes digitales y aplicaciones*. RA-MA.
39. Pajares, G., de la Cruz, J.M. (2007b). *Ejercicios resueltos de Visión por Computador*. RA-MA.
40. Pajares, G., Ruz, J.J., de la Cruz, J.M. (2009). Image Change detection from difference image through deterministic simulated annealing. *Pattern Analysis and Applications*, 12, 137-150.
41. Palacios, A., Merino, S., Litago, J.J. (2009). Using MODIS time series for burn area mapping. *Proc. Geophysical Research Abstracts*, vol. 11, pp. 12661-12665, EGU2009-12661, Viena.
42. Palmer, S.E. (1999). *Vision Science*. Cambridge, MA: MIT Press.
43. Pearson, R. L., y Millar, L. D. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. Ann Arbor, MI: ERIM.
44. Pinilla, C. (1993). *Elementos de Teledetección*. RA-MA, Madrid.

45. Portilla, J., Simoncelli, E.P. (2000). A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. *Int. J. Comput. Vision* 40 (1), 49–71.
46. Qiao, Y.-L., Lu, Zh.-M. (2006) Spline wavelets based texture features for image retrieval. *Int. J. Innovative Comput. Inf. Control* 2 (3), 653–658.
47. Russ, J.C. (1999). *The Image Processing Handbook*, 3rd edition, CRC Press, Florida
48. Scott Murray, R., Pamela L. Nagler, Kiyomi Morino and Edward P. Glenn (2009). An Empirical Algorithm for Estimating Agricultural and Riparian Evapotranspiration Using MODIS Enhanced Vegetation Index and Ground Measurements of ET. II. Application to the Lower Colorado River, U.S. *Remote Sensing*, 1, 1125-1138.
49. Tomita, F. Tsuji, S. (1990). *Computer Analysis of Visual Textures*, Kluwer Academic Publishing, Massachusetts.
50. Tsaneva, M.G., Krezhova, D.D., Yanev, T.K. (2010). Development and testing of a statistical texture model for land cover classification of the Black Sea region with MODIS imagery. *Advances in Space Research*, 46, 872-878.
51. Unser, M. (1995) Texture Classification and Segmentation Using Wavelet Frames, *IEEE Transactions on Image Processing* 4, 1549-1560.
52. Volante, J.N., Bianchi, A.R. (2003). Índice de vegetación normalizado diferencial (NDVI) de las Yungas y del Chaco Semiárido en el Noroeste Argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
53. Zhu, C., Yang, X. (1998) Study of remote sensing image texture analysis and classification using wavelet. *Int. J. Remote Sens.* 13, 3167–3187.